



Vlaanderen
is milieu

Verziltingstoestand van het oostelijk kustgebied

Resultaten van het elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht

DANKWOORD

De volgende experts worden uitdrukkelijk bedankt voor hun constructieve review:

Em. Prof. Dr. William De Breuck (UGent), Em. Prof. Dr. Luc Lebbe (UGent), Dr. Andrea Viezzoli (Aarhus Geophysics), Frans Schaars (Artesia), André van de Straat (Provincie Zeeland), Dirk Vancraeynest (Oostkustpolder) en Jan De Bie (VLM).

SAMENVATTING

In april 2014 voerde de VMM metingen uit aan de kust om de verziltingstoestand van het grondwater te bepalen. Voor dit elektromagnetisch onderzoek werd een helikopter met een meetsonde ingezet. Het gaat om het grondwater in het oostelijk gedeelte van de kustvlakte, namelijk een gebied dat zich situeert op het grondgebied van Knokke-Heist, Damme en Brugge. Het grondwater in dit gebied is van nature verzilt waardoor je er zowel zoet, brak als zout water aantreft. De bedoeling van de studie was om de juiste verdeling tussen de verschillende soorten water te meten en in kaart te brengen.

Deze verdeling werd al eens in kaart gebracht in de jaren 1960 en 1970, wat resulteerde in de publicatie van een verziltingskaart. Na een halve eeuw is deze kaart aan herziening toe. Het gebied onderging heel wat ontwikkelingen waarbij de verhouding tussen zoet en zout water beïnvloed werd. Zo is het gebied intussen verstedelijkt en werd de haven uitgebouwd. Ook lopen er vandaag grootschalige projecten waarvoor een juiste kennis van de zoet-zoutverdeling erg belangrijk is. En ten slotte wordt ook het drinkwater beïnvloed omdat de zoetwaterlenzen aangesproken worden voor de drinkwatervoorziening.

De helikoptermetingen tonen op het eerste gezicht een complexe verdeling van zoet en zout grondwater. Uit nader onderzoek blijkt dat er een verband is met de bodemsoort, de topografie en het zoutgehalte in de waterlopen. Waar het grensvlak tussen zoet en zout grondwater ondiep voorkomt, hebben we te maken met laaggelegen en slecht doorlatende poelgronden. In de topografisch hoger gelegen gebieden zoals de kreekruggen, het duingebied en de overgangszone naar de Zandstreek, bevindt het grensvlak zich dieper.

De verschillen tussen de oude en de nieuwe kaart zijn klein en in hoofdzaak te wijten aan een verschil in interpolatie. Het belangrijkste verschil is merkbaar ter hoogte van de achterhaven van Zeebrugge, waar door de ontwikkeling van de haven een verandering in verdeling van zoet en zout grondwater is opgetreden. Over het algemeen kan echter uitgegaan worden van een vrij stabiele verziltingssituatie in het oostelijk deel van het kustgebied.

Met een veranderend klimaat en een stijgende zeespiegel bestaat de kans dat het evenwicht tussen zoet en zout grondwater verstoord zal worden. De nieuwe kaart laat toe de situatie op te volgen waardoor tijdig kan ingegrepen worden om de zoetwaterbeschikbaarheid in het gebied veilig te stellen.

INHOUD

1	Inleiding.....	9
2	Het oostelijk kustgebied.....	9
3	De verziltingskaart uit 1974 en 1989.....	10
4	Elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht (AEM).....	12
4.1	Principe.....	12
4.2	De helikoptervluchten.....	14
4.3	Dataverwerking.....	15
5	Definitie van het nieuwe grensvlak.....	15
6	Nieuwe kaarten en data.....	18
6.1	Diepte van het 6 Ω m-grensvlak in meter t.o.v. het maaiveld.....	18
6.2	6 Ω m-grensvlak in m TAW.....	19
6.3	Datapunten en resistiviteitsprofiel.....	19
7	Validatie van de metingen.....	21
7.1	Inleiding.....	21
7.2	Grondwateranalyses.....	22
7.3	Boorgatmetingen en sonderingen.....	24
7.4	Elektromagnetisch onderzoek aan het maaiveld.....	29
7.5	Besluit.....	34
8	Algemene verziltingstoestand.....	34
9	De Bartoon aquitard.....	38
10	Evolutie van de verziltingstoestand.....	39
10.1	Vergelijking met de oude verziltingskaart.....	39
10.2	Vergelijking met de chloridetrend in grondwater.....	43
10.3	Bespreking van de verschillen.....	44
10.3.1	Grondgebied Brugge.....	44
10.3.2	Grondgebied Damme.....	53
10.3.3	Grondgebied Knokke.....	63
11	Algemeen besluit.....	71
12	Referenties.....	72
bijlage 1	Omzetting van het 6 Ω m-grensvlak en 1500 mg/l TDS-grensvlak naar EC-waarden.....	76

[illegible]

Tabel 1: (bulk)resistiviteitswaarden voor verschillende lagen (Maréchal <i>et al.</i> , 1969)	11
Tabel 2: geleidbaarheden van het poriënwater met kwalitatieve beoordeling volgens De Moor & De Breuck (1969).....	22
Tabel 3: P-waarde en Kendall's Tau als waarden voor de statistische significantie van de correlatie tussen de helikoptermetingen en boorgatmetingen/sonderingen.	24
Tabel 4: exploratiedieptes voor Geonics EM instrumenten (Northwest Geophysical Associates Inc., 2000) .	30
Tabel 5: resistiviteit en overeenkomstige geleidbaarheden met weergave kleurcode gebruikt in figuren 20-22 31	
Tabel 6: beschrijvende statistiek voor de verschillen tussen het 1500 mg/l TDS-grensvlak en bulkresistiviteiten 6, 8, en 10 Ω m voor datapunten op minder dan 50 m van een meetpunt gebruikt bij de opmaak van de oude kaart.....	43

Figuur 1: het oostelijk kustgebied weergegeven op stafkaart (bron: MercatorNet, topokaart 2009)	10
Figuur 2: geo-elektrische meting met weergave van de schijnbare resistiviteit (Ωm) in functie van elektrodenafstand in meter (Wenner-opstelling).	11
Figuur 3: de verziltingskaart uit 1974 en 1989 met inbegrip van de update in 2010	12
Figuur 4: meetprincipe van AEM en meer specifiek het SkyTEM-systeem.	13
Figuur 5: gevlogen lijnen (rood) versus geplande lijnen (blauw), inzet: weersomstandigheden en dagboek van de vluchten (Artesia, 2014).....	14
Figuur 6: bulkresistiviteit onder het grensvlak in functie van bulkresistiviteit boven het grensvlak gemeten door De Breuck et al. (1974) (naar Vandenbohede et al., 2015).	17
Figuur 7: diepte van het 6 Ωm -grensvlak in meter ten opzichte van het maaiveld (situatie april 2014)	18
Figuur 8: het 6 Ωm -grensvlak in meter TAW (situatie april 2014)	19
Figuur 9: datapunten van het elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht (AEM).....	20
Figuur 10: resistiviteitsprofiel langsheen een vluchtlijn centraal het studiegebied (Y-as in m TAW, X-as in Lambertcoördinaat).....	21
Figuur 11: vergelijking tussen EC-waarden van grondwateranalyses, het 1500 mg/l TDS-grensvlak en oplopende diepte van het 6 Ωm grensvlak	23
Figuur 12: vergelijking tussen boorgatmeting 3-KPS-0006a, AEM en de oude verziltingskaart (DB) met weergave van EC-waarden peilputfilters	26
Figuur 13: ligging van de meetpunten uit het onderzoek van Vrancken (1997) met als achtergrond het 6 Ωm -grensvlak in m TAW	27
Figuur 14: kopie van het resistiviteitsprofiel opgesteld door Vrancken (1997) op basis van LN-metingen en het classificatiesysteem van De Moor & De Breuck (1969).	27
Figuur 15: geïnterpoleerde diepte van het 6 Ωm -grensvlak (2014) langsheen het profiel Vrancken (1997). ..	28

5

Figuur 16: vergelijking tussen boorgatmeting (Vrancken, 1997) en AEM-meting met dezelfde diepteschaal.	29
Figuur 17: situering van de raaien waarlangs EM31 en EM34-metingen werden uitgevoerd.....	30
Figuur 18: puntmetingen AEM versus raaien EM31 (HD) met weergave van de diepte van het 6 Ωm grensvlak.....	32
Figuur 19: puntmetingen AEM versus raaien EM31 (VD) met weergave van de diepte van het 6 Ωm grensvlak.....	32
Figuur 20: puntmetingen AEM versus raaien EM34 (HD, 20 m) met weergave van de diepte van het 6 Ωm grensvlak.....	33
Figuur 21: puntmetingen AEM versus raaien EM34 (HD, 40 m) met weergave van de diepte van het 6 Ωm grensvlak.....	33
Figuur 22: AEM-resistiviteitsprofiel per raai telkens van west naar oost.	34
Figuur 23: 6 Ωm-grensvlak in mTAW met weergave van waterlopen	35
Figuur 24: weergave van de verschillende landschappen en uitbreiding van de transgressiefasen tussen Oostende en de Nederlandse grens (Ameryckx, 1959).....	36
Figuur 25: weergave van het 6 Ωm-grensvlak met gemiddeld chloridegehalte van een aantal belangrijke waterlopen voor de periode 2000-2010 (bron: VMM)	37
Figuur 26: scherpe overgangszone in resistiviteitswaarden waar de Bartoon aquitard uitwigt (groene lijn centraal in het studiegebied).	39
Figuur 27: weergave van het verschil in diepte tussen het 6 Ωm-grensvlak en het 1500 mg/l TDS grensvlak, samen met de originele VES-meetpunten waarmee de oude kaart werd opgemaakt (locaties in het zuiden zijn echter niet gekend).	40
Figuur 28: frequentieverdeling en beschrijvende statistiek van het verschil tussen 6 Ωm-grensvlak en 1500 mg/l TDS-grensvlak voor alle datapunten van de helikopter	41
Figuur 29: boxplots van de verschillen tussen het 1500 mg/l TDS-grensvlak en bulkresistiviteiten 3, 6, 8, 10 en 25 Ωm voor alle AEM-datapunten.....	42
Figuur 30: boxplots van de verschillen tussen het 1500 mg/l TDS-grensvlak en bulkresistiviteiten 3, 6, 8, 10 en 25 Ωm voor datapunten op minder dan 50 m van een oud meetpunt.....	42
Figuur 31: weergave van het verschil in diepte tussen het 6 Ωm-grensvlak en het 1500 mg/l TDS grensvlak, samen met de chloridetrend van peilputfilters in het projectgebied	44
Figuur 32: situatie ter hoogte van het Boudewijnkanaal (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak; zie legende).....	45
Figuur 33: resistiviteitsplot ter hoogte van Witte Molen (Lissewege) op de westelijke oever Boudewijnkanaal.	46
Figuur 34: resistiviteitsplot ter hoogte van Ter Doest (Lissewege) op de westelijke oever van het Boudewijnkanaal.	47
Figuur 35: situatie ter hoogte van achterhaven (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)	48
Figuur 36: resistiviteitsprofiel van west naar oost doorheen Boudewijnkanaal, achterhaven en poldergebied	49
Figuur 37: resistiviteitsplot ter hoogte van opgehoogde zone achterhaven (links) met diep 6 Ωm-grensvlak en resistiviteitsplot ter hoogte van Dudzeelse polder (rechts) met zeer ondiep 6 Ωm grensvlak.....	50
Figuur 38: resistiviteitsplot ter hoogte van polder ten zuiden achterhaven (Dudzele).	50

Figuur 63: situatie ter hoogte van Ramskapelle (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)70

Figuur 64: resistiviteitsplot ter hoogte van Ramskapelle (links) en ten oosten van Ramskapelle (rechts).70



1 INLEIDING

De kust wordt bovengronds gekenmerkt als een vlak polderlandschap met duinen, strand en zee. Minder gekend is dat er zich in de ondergrond een complexe verdeling van zoet en zout grondwater schuilhoudt. Deze complexe verdeling is een stille getuige van een lange inpolderingsgeschiedenis waarbij de mens het pleit won van de zee. Eens ingepolderd kon infiltrerend hemelwater het zilte grondwaterreservoir verzoeten waardoor zoetwaterlenzen werden gevormd. Deze zoetwaterlenzen staan echter onder druk door verontreiniging, winning van grondwater, klimaatverandering en zeespiegelstijging. Een goed beheer van deze schaarse zoetwatervoorraden is daarom van belang om de watervoorziening in het kustgebied op korte en lange termijn veilig te stellen.

Een van de kerntaken van de Vlaamse Milieumaatschappij is een goed beheer van de grondwaterreserves in Vlaanderen. Om de zoetwaterreserves in het kustgebied goed te beheren is kennis vereist over de huidige toestand. Voorliggend project, waarbij de verziltingstoestand van het oostelijk kustgebied in kaart werd gebracht, beantwoordt aan deze doelstelling en vormt een referentie voor toekomstig verziltingsonderzoek in Vlaanderen.

2 HET OOSTELIJK KUSTGEBIED

Het oostelijk kustgebied, weergegeven op figuur 1, wordt afgebakend door de Nederlandse grens in het oosten en het Boudewijnkanaal in het westen. Het gebied kent uiteenlopende economische en maatschappelijke functies waaronder haven, landbouw, toerisme, recreatie, wonen en natuur. Hydrogeologisch behoort het gebied tot het Kust- en Poldersysteem (VMM, 2008). Het grondwater is er van nature verzilt waardoor zowel zoet, zout als brak grondwater worden aangetroffen. Deze zoet-zoutwaterverdeling werd in de jaren 1960-1970 gekarteerd en gepubliceerd als de zogenaamde verziltingskaart (De Breuck, 1974 & 1989).

Een halve eeuw later is er nood aan een gebiedsdekkende kartering waarbij de verziltingstoestand opnieuw in kaart wordt gebracht. Het gebied heeft immers heel wat ontwikkelingen doorgemaakt zoals de uitbouw van de haven van Zeebrugge en een verdere verstedelijking van het gebied, waardoor de zoet-zoutwaterverdeling werd beïnvloed. Daarnaast zijn er anno 2015 grootschalige projecten lopende (bv. aanleg autosnelweg A11) of in ontwikkeling (bv. uitbreiding van het Zwin) waarbij de zoet-zoutwaterverdeling een belangrijke randvoorwaarde is. De aanwezige zoetwaterlenzen worden bovendien aangesproken voor drinkwatervoorziening en landbouwdoeleinden. Een nieuwe kartering draagt bij tot de kennis van de omvang van deze zoetwaterlenzen en legt een referentiesituatie vast in het licht van korte- en langetermijnprojecten, zeespiegelstijging en klimaatsverandering. Een vergelijking met de bestaande verziltingskaart kan bovendien inzicht geven in de autonome ontwikkeling van de zoet-zoutwaterverdeling gedurende de laatste decennia.

[illegible]

Droog zand	100 – 1000 Ω m
Zand	40 – 100 Ω m
Leem	25 – 40 Ω m
Zandige klei	15 – 30 Ω m
Klei	7 – 15 Ω m
Lagen met brak of zout water	1,2 – 10 Ω m

INTERPRETATION GEM: DISTR2

Y-axis: Schijnbare resistiviteit (Ωm)

X-axis: elektrodenafstand (m)

r1 55.00	n1 1.80
r2 14.00	n2 4.00
r3 1.70	n3 22.00
r4 7.00	

¹ Vandaag kan men gebruik maken van inverse modellen om de geo-elektrische meting te vertalen naar een lagenmodel.

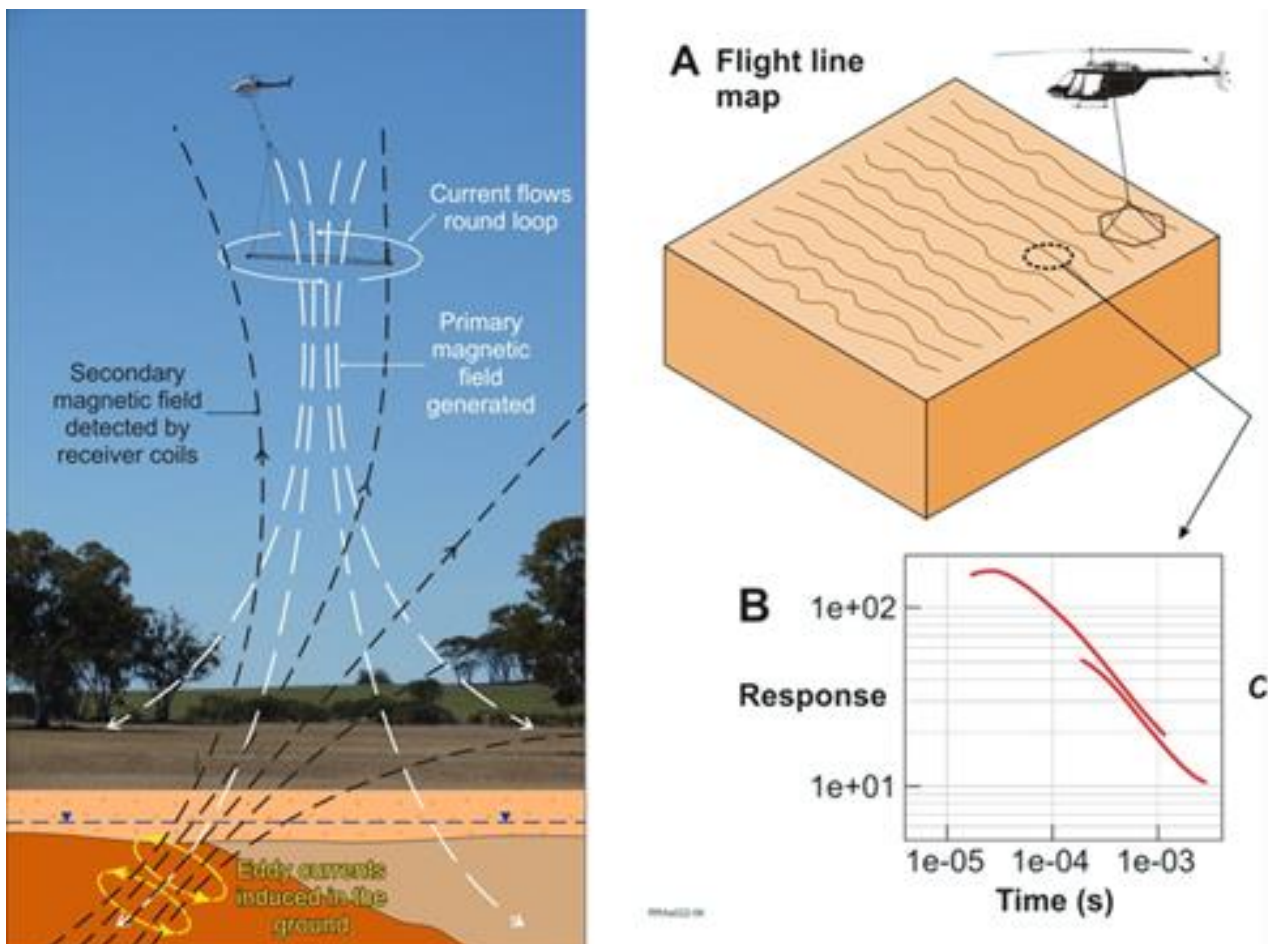
De verziltingskaart van 1974 en 1989 is jarenlang dé referentie geweest voor de zoet-zoutwaterverdeling binnen het kustgebied. Het ontwikkelen van deze kaart was pionierswerk van Professor Emeritus William De Breuck, het toenmalig hoofd van het Labo van Toegepaste Geologie en Hydrogeologie (LTGH) van de Universiteit Gent. Voor de Middenkust (Zeebrugge tot Nieuwpoort) werd een update van de kaart gepubliceerd in 2010 (Vandenbohede *et al*, 2010).

Figuur 3: de verziltingskaart uit 1974 en 1989 met inbegrip van de update in 2010

4.1 Principe

Voor dit onderzoek werd gebruik gemaakt van het SkyTEM systeem (SkyTEM, 2015) waarbij een meetsonde in de vorm van een hoepel wordt opgehangen aan een helikopter. De hoepel stuurt een wisselend magnetisch veld uit met hoogfrequente pulsen (primaire veld in wit, figuur 4). Wanneer zo'n magnetische puls de ondergrond bereikt, ontstaan er elektrische stromen (zogenaamde Foucaultstromen of wervelstromen). De sterkte van deze elektrische stromen is afhankelijk van hoe goed de bodem geleidt. Deze elektrische stromen geven op hun beurt het ontstaan aan een tweede magnetisch veld (secundair veld in zwart, figuur 4) dat gedetecteerd wordt door de hoepel. Wanneer het primaire veld uit gaat, meet men het verval van het secundaire veld (figuur 4B). Uit dit verval leidt men de weerstand of resistiviteit af van de bodem.

Een vergelijking kan worden gemaakt met een metaaldetector waarbij geleidende objecten, in dit geval zilte sedimenten, worden opgespoord. Net zoals bij de geo-elektrische metingen wordt uiteindelijk een resistiviteit in functie van de diepte verkregen. Het grote voordeel van deze metingen is de grote dichtheid aan datapunten en de korte tijd waarin gebiedsdekkend een beeld verkregen wordt van de resistiviteit van de ondergrond (figuur 4).

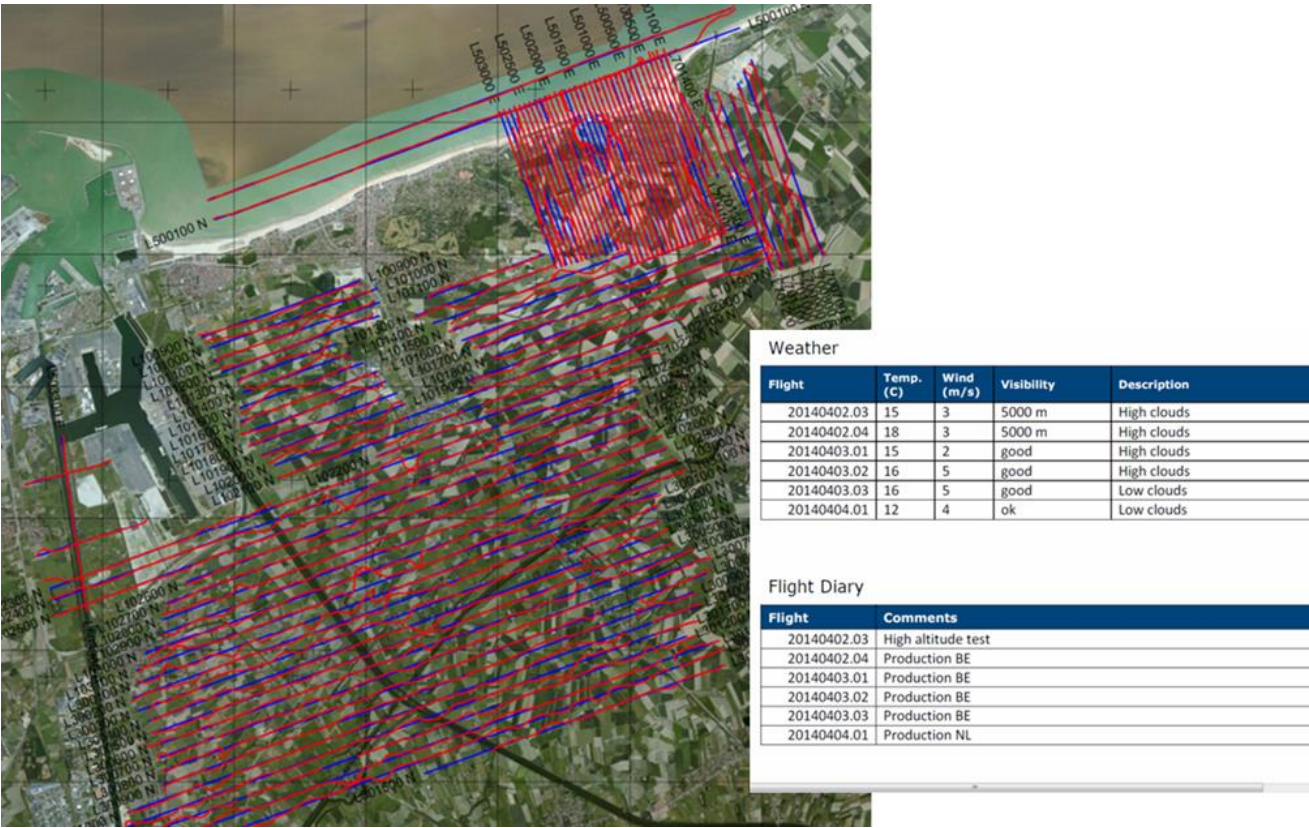


Figuur 4: meetprincipe van AEM en meer specifiek het SkyTEM-systeem. Links: werkingsprincipe; A: verdeling van een gebied in vluchtlijnen; B: Meting van de respons (geschaald voltage) als functie van de tijd voor een grote en een kleine stroompuls (Artesia, 2014)

4.2 De helikoptervluchten

Na uitvoering van de nodige testen werden de vluchten uitgevoerd op 2, 3 en 4 april 2014. Op onderstaande kaart wordt het vluchtplan in blauw en de effectief gevlogen lijnen (of productielijnen) in rood weergegeven. De vluchtlijnen zijn zuidwest-noordoost georiënteerd met een lijnafstand van 250 m. Deze oriëntatie laat toe om een aantal kanalen in het gebied loodrecht aan te snijden zodat we profielen loodrecht op de kanalen verkrijgen. Wegens de geplande uitbreiding van het Zwin was in en nabij het Zwin een hogere resolutie wenselijk en werd gevlogen met een lijnafstand van 100 m. Om de overgang tussen strand, duin en polder nauwkeurig in kaart te brengen werd bovendien gekozen voor een noordwest-zuidoostelijke oriëntatie van de vluchtlijnen.

Afwijkingen tussen het vluchtplan en de productielijnen ontstaan door begrenzing van de vluchten door een grote weg of door obstakels op de route van de vluchtlijn. Dit kunnen huizen zijn of bouwkranen, maar in sommige gevallen kan ook loslopend vee een reden zijn voor de piloot om van het aangegeven pad af te wijken. Over het algemeen zijn de geplande vluchtlijnen goed gevolgd.



Figuur 5: gevlogen lijnen (rood) versus geplande lijnen (blauw), inzet: weersomstandigheden en dagboek van de vluchten (Artesia, 2014)

4.3 Dataverwerking

De verkregen data ondergingen een aantal bewerkingen zoals hoogtecorrecties, verwijdering van verstoringen en verlaging van de ruis. Vervolgens werden er meerdere inversies uitgevoerd. Bij een inversie wordt met behulp van automatische optimalisatie een elektrisch weerstandsbeeld (lagenmodel) van de ondergrond bepaald dat zo goed mogelijk past bij de metingen. Het uiteindelijk resultaat is een 3D resistiviteitsbeeld van de ondergrond.

5 DEFINITIE VAN HET NIEUWE GRENSVLAK

De oude verziltingskaart maakt gebruik van het 1500 mg/l TDS grensvlak. Dit grensvlak is geen vaste resistiviteitswaarde maar het resultaat van een diepte verkregen door het toepassen van een lagenmodel op de verkregen resistiviteitsdata van de geo-elektrische metingen en een omzetting naar TDS. Interpolatie tussen de verschillende meetpunten werd verkregen door toepassing van de toen geldende inzichten inzake bodemopbouw en hydrogeologische processen van de kustvlakte. Klassieke interpolatiemethodes zoals Kriging gaven immers een onrealistisch beeld, mede door de relatief grote afstand tussen de meetpunten.

Het voordeel om een grensvlak weer te geven als een TDS-waarde is het rechtstreeks verband met de kwaliteit van het grondwater. Een TDS-waarde kan immers worden bepaald in het labo door een analyse van een grondwaterstaal waardoor een rechtstreekse vergelijking met de diepte van het grensvlak mogelijk is. De kaart is echter niet eenvoudig reproduceerbaar. De reproduceerbaarheid heeft te maken met de omzetting van resistiviteit naar TDS en met de gebruikte interpolatiemethode.

Om de TDS af te leiden uit een resistiviteit is kennis vereist van de formatiefactor F en de conversiefactor f_{11} (Vandenbohede *et al.*, 2015). Met behulp van de formatiefactor kan uit de resistiviteit van de ondergrond de resistiviteit van het poriënwater worden afgeleid². Uit de poriënwaterresistiviteit kan de TDS afgeleid worden waarvoor de conversiefactor gekend moet zijn (Lebbe & Pede, 1986). Beide factoren kunnen echter variëren. Het omzetten van resistiviteitsdata naar TDS leidt dus tot onzekerheden waardoor bijkomende data zoals grondwateranalyses en boorbeschrijvingen noodzakelijk zijn om tot een goede interpretatie van het 1500 mg/l TDS-grensvlak te komen. Een reproductie van de kaart wordt verder bemoeilijkt door de toen gehanteerde interpolatiemethode waarbij het inzicht van de karteerder in de bodemopbouw en de hydrogeologische processen bepalend was voor het eindproduct.

Daarnaast geeft de kaart niet steeds het 1500 mg/l TDS-grensvlak weer. Volgens Vandenbohede *et al.* (2015) zit er immers een variatie op de TDS-waarde van het grensvlak, waarbij 1500 mg/l een goed gemiddelde is. De onzekerheid op de TDS-waarde werd ondervangen door diepteklassen van 5 meter te definiëren waarop het grensvlak voorkomt (met uitzondering van de eerste 5 meter waarbij 2 klassen werden gedefinieerd, nl. 0-2 m en 2-5 m).

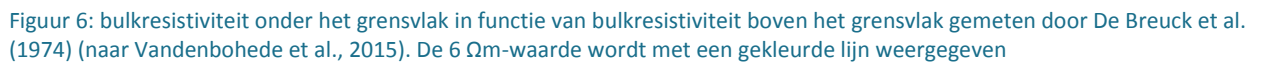
² Voor zandige sedimenten, wat in hoofdzaak het geval is voor de freatische aquifer in de kustvlakte, kan de resistiviteit van het poriënwater worden afgeleid met de Wet van Archie (1942). Bij afzettingen met betekenisvolle silt- en kleifraction moet echter de vergelijking van Patnode & Willie (1950) worden toegepast.

Voor de nieuwe kaart werd gekozen om een vaste resistiviteitswaarde te definiëren als diepte van het grensvlak. Het betreft een bulkresistiviteit, namelijk de gezamenlijke resistiviteit van sediment en grondwater. Het resultaat is dus niet alleen afhankelijk van de kwaliteit van het grondwater; maar het wordt ook beïnvloed door de aard van het sediment. Het is daarom van belang een waarde te kiezen waarbij het aandeel van het grondwater doorslaggevend is voor de bulkresistiviteit zodat de invloed van het sediment verwaarloosbaar is. Een definitie op basis van een bulkresistiviteit levert belangrijke voordelen op:

1. De waarde is eenduidig: het betreft een vaste resistiviteitswaarde.
2. Bulkresistiviteiten zijn rechtstreeks te vergelijken met resultaten van andere frequent toegepaste geofysische methodes die dezelfde grootheid bepalen zoals long- en short-normal boorgatmetingen, elektromagnetische metingen aan het maaiveld en EC-sonderingen. Door de helikoptermetingen te vergelijken met andere geofysische metingen uitgevoerd in het projectgebied kunnen we controleren of de helikopter meet wat hij zou moeten meten (validatie). Omgekeerd kunnen de resultaten van de helikoptermetingen een bijdrage leveren aan projecten waar geofysische methodes frequent worden toegepast.
3. Een grensvlak is op basis van een bulkresistiviteit gemakkelijk reproduceerbaar. De verkregen resistiviteitsdata moeten niet meer omgerekend worden waardoor het resultaat niet afhankelijk is van onzekerheden op omzettingsfactoren. Bovendien zorgt de grote dichtheid aan meetpunten ervoor dat de interpolatiemethode minder zwaar doorweegt in het eindresultaat in vergelijking met de oude kaart, waar de dichtheid aan meetpunten een stuk kleiner was.
4. Een vergelijking met een toekomstige meetcampagne is mogelijk waarbij uitspraken kunnen worden gedaan over verzoeting of verzilting indien een identieke inverse modellering wordt toegepast. De bulkresistiviteit wordt immers bepaald door de matrix (zand, silt of klei) en de saliniteit van het grondwater. Aangezien de matrix een vast gegeven is en niet wijzigt in de toekomst, zal een verandering in resistiviteitsbeeld kunnen toegeschreven worden aan een wijziging in saliniteit. De nieuwe kaart geeft dus een referentiesituatie weer (april 2014) waaraan latere meetcampagnes kunnen worden afgetoetst.
5. Een weloverwogen keuze van een resistiviteitswaarde geeft als grensvlak een betrouwbaar beeld van de zoet-zoutwaterverdeling in de ondergrond vergelijkbaar met de bestaande verziltingskaart (zie verder).

Op basis van eerdere publicaties over resistiviteitsonderzoek in Vlaanderen werd gekozen voor een resistiviteitswaarde van **6 Ωm** . De keuze van de grens berust op het feit dat wij waarden onder de 6 Ωm vrijwel steeds kunnen toeschrijven aan de aanwezigheid van brak of zout poriënwater (De Moor & De Breuck, 1964 & 1969, Vandenbohede *et al.*, 2015).

Dit wordt geïllustreerd aan de hand van figuur 6 (naar Vandenbohede *et al.*, 2015). Elk punt op de figuur komt overeen met een locatie van een VES-meting uitgevoerd voor het opmaken van de oude verziltingskaart. Voor elk van deze VES-meetlocaties werd de resistiviteit verkregen uit de VES-metingen boven en onder het grensvlak van de oude kaart afgeleid op de betreffende locatie. Deze twee resistiviteiten werden per locatie ten opzichte van elkaar uitgezet in de figuur. Uit deze figuur valt af te leiden dat de bulkresistiviteiten gemeten onder het grensvlak van de oude kaart voornamelijk onder de 6

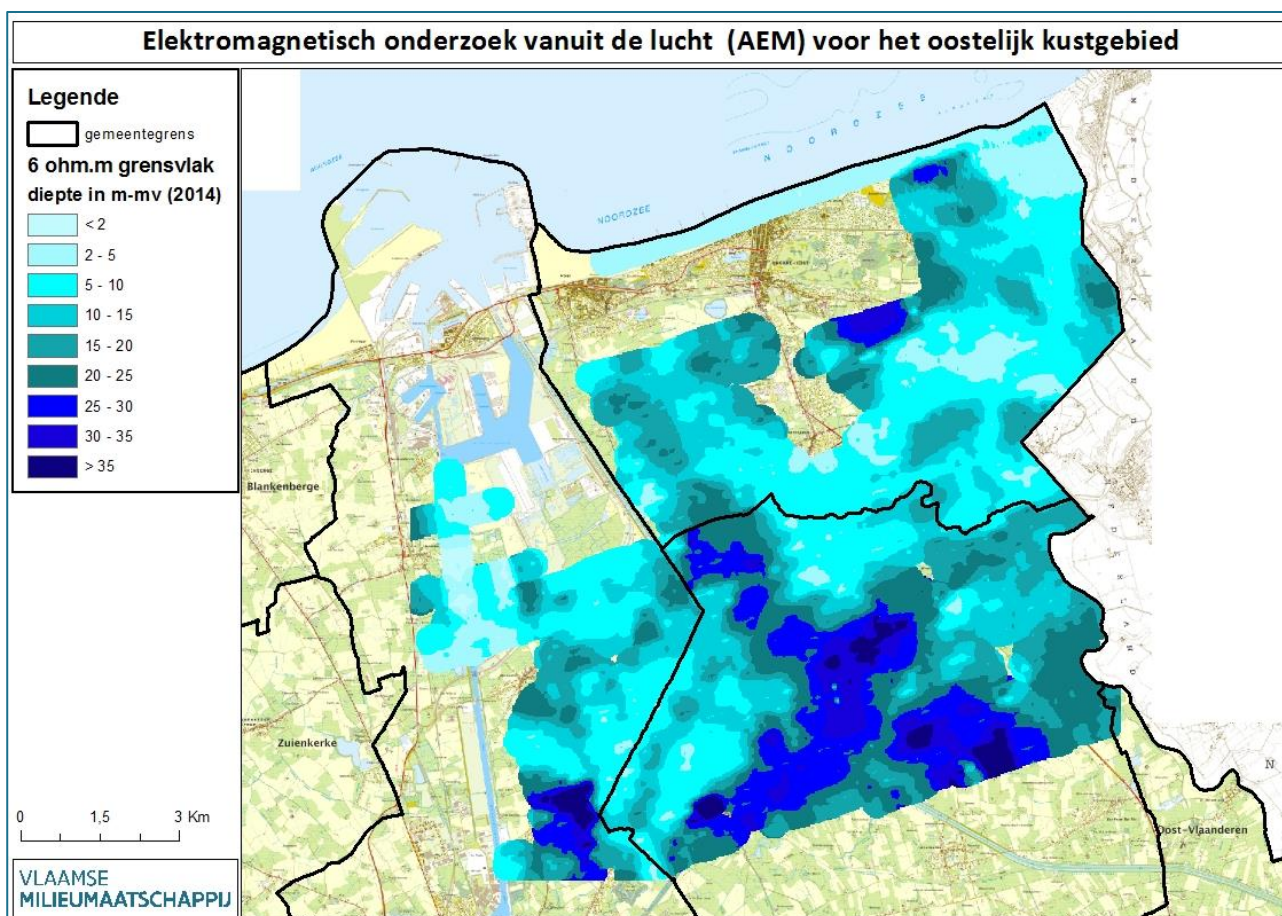


6 NIEUWE KAARTEN EN DATA

Volgende data worden beschikbaar gesteld via Databank Ondergrond Vlaanderen (<http://dov.vlaanderen.be>):

6.1 Diepte van het 6 Ω m-grensvlak in meter t.o.v. het maaiveld

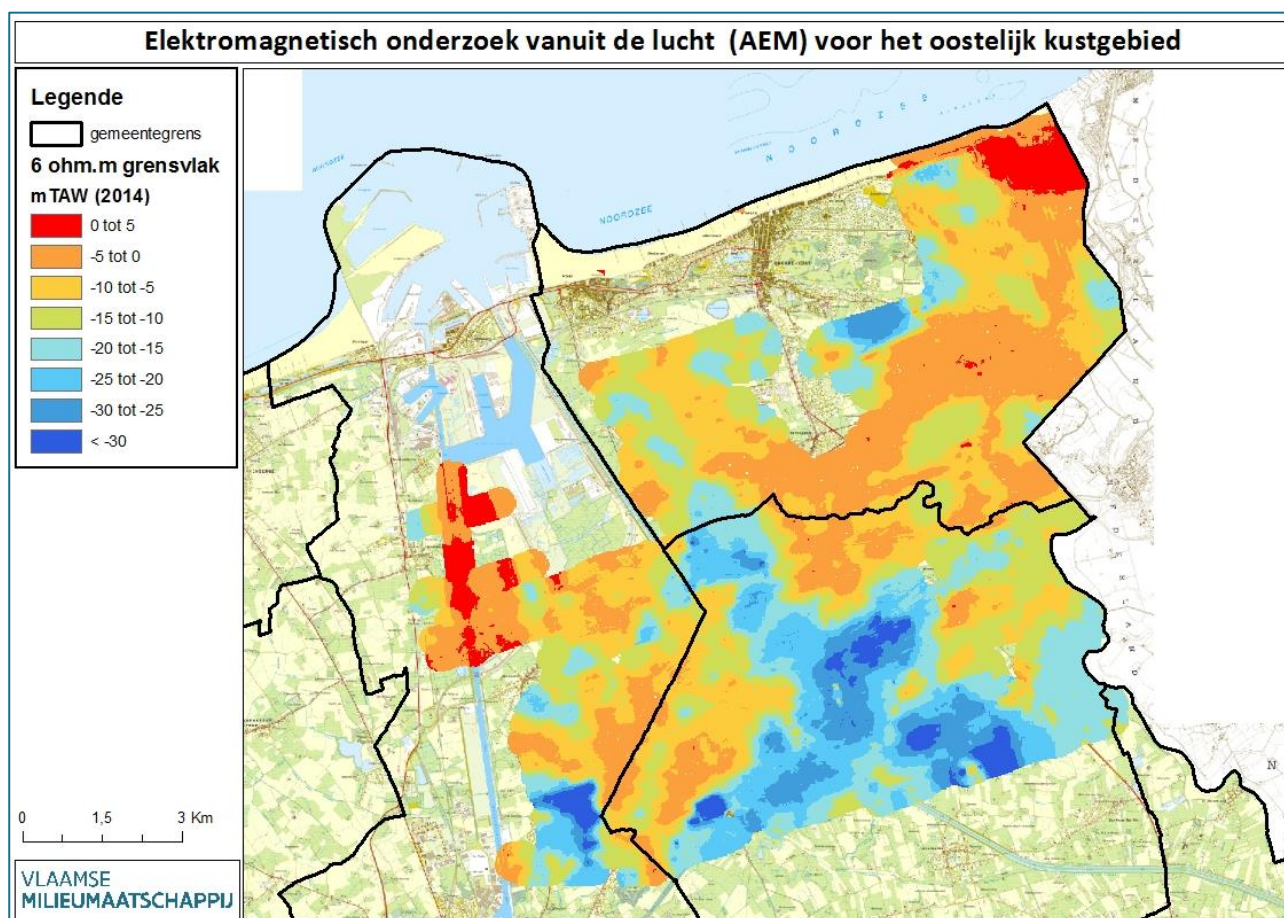
Figuur 7 geeft de diepte van het 6 Ω m-grensvlak weer in meter t.o.v. het maaiveld (m-mv). De kaart is een raster bestaande uit cellen van 25 op 25 m. Hoe lichter de kleur, hoe ondieper het grensvlak voorkomt. Door variaties in topografie (opgehoogde zones, overgang polders-duinen) geeft de diepte van het grensvlak t.o.v. het maaiveld op sommige plaatsen lateraal een vertekend beeld in 3D. Daarom werd ook een kaart in m TAW geconstrueerd (figuur 8).



Figuur 7: diepte van het 6 Ω m-grensvlak in meter ten opzichte van het maaiveld (situatie april 2014)

6.2 6 Ω m-grensvlak in m TAW

Door de kaart om te zetten naar een grensvlak in m TAW met behulp van het Digitaal Hoogte Model (DHM) komt het reliëf van het grensvlak tot uiting (figuur 8). De omzetting naar TAW vereiste echter een aantal correcties. Door interpolatie tussen datapunten werden sommige topografische elementen, zoals dijken en kanaaloeveren, niet meegenomen waardoor een correctie noodzakelijk was. De cellen die als anomalie tevoorschijn kwamen, werden verwijderd en een nieuwe waarde werd verkregen op basis van interpolatie van de naburige cellen. Op de verkregen TAW kaart wordt de ondiepe ligging van het grensvlak in oranje/rood weergegeven. In de blauwe zones bevindt het grensvlak zich diep. Het resultaat is opnieuw een complex patroon van zoet en zout grondwater.

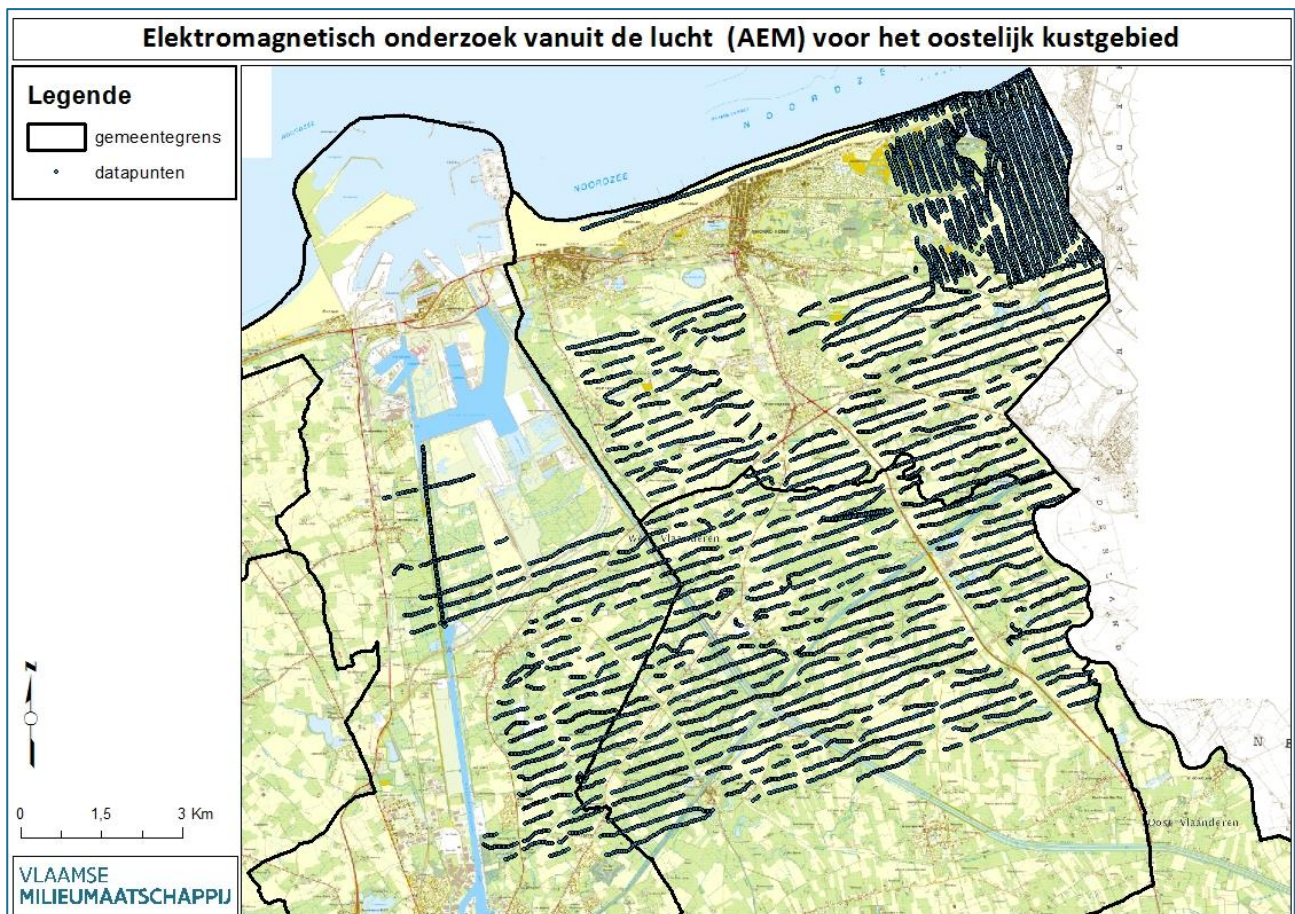


Figuur 8: het 6 Ω m-grensvlak in meter TAW (situatie april 2014)

6.3 Datapunten en resistiviteitsprofiel

Naast kaarten van het 6 Ω m-grensvlak (in m-mv en mTAW) zullen ook de locaties van de gebruikte datapunten kunnen geconsulteerd worden op DOV (figuur 9). Op deze manier kan de gebruiker inschatten waar gemeten werd en waar geïnterpoleerd werd. Per vluchlijn kan bovendien het resistiviteitsprofiel opgevraagd worden (figuur 10). Dit levert een duidelijk beeld op van de resistiviteitsverdeling in de ondergrond.

Als voorbeeld werd een vluchlijn centraal het gebied geselecteerd. Opvallend is de zone met hoge resistiviteiten in het midden van het profiel (blauwe kleur). Deze hoge resistiviteiten wijzen op het voorkomen van een zoetwaterlens. Deze zoetwaterlens is ook op figuren 7 en 8 duidelijk zichtbaar door het diep voorkomen van het 6 Ω m-grensvlak. Op het profiel is aan de rechterzijde de Bartoonklei zichtbaar (-25 m TAW): na het bereiken van lage resistiviteitswaarden (zilt water) aan de basis van het Quartair neemt de resistiviteit opnieuw toe met de diepte door de aanwezigheid van de Bartoonklei en Ledo-Paniseliaan aquifer. Aan de linkerzijde is de Bartoonklei afwezig en is het grondwater tot op grotere diepte verzilt (rode kleur).



Figuur 9: datapunten van het elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht (AEM)

7.2 Grondwateranalyses

Zoals eerder vermeld kunnen bulkresistiviteiten omgezet worden naar poriënwaterresistiviteiten mits kennis van de formatiefactor. Deze poriënwaterresistiviteiten kunnen op hun beurt omgezet worden naar geleidbaarheden of EC-waarden. Deze omzetting laat toe om het 6 Ω m-grensvlak te vergelijken met grondwateranalyses en meer bepaald EC-metingen uitgevoerd op grondwaterstalen afkomstig van peilputten gelegen in het studiegebied. In onderstaande tabel wordt de classificatie van De Moor & De Breuck (1969) weergegeven volgens de geleidbaarheid of EC-waarden bij 18°C.

Tabel 2: geleidbaarheden van het poriënwater met kwalitatieve beoordeling volgens De Moor & De Breuck (1969)

Geleidbaarheid of EC-waarde (bij 18°C, in $\mu\text{S}/\text{cm}$)	Kwalitatieve beoordeling
< 200	Zeer zoet
200 – 400	Zoet
400 – 800	Matig zoet
800 – 1600	Zwak zoet
1600 – 3200	Matig brak
3200 – 6400	Brak
6400 – 12800	Zeer brak
12800 – 25600	Matig zout
25600 – 38400	zout

In figuur 11 is een vergelijking gemaakt met grondwateranalyses afkomstig van peilputten van het primair en freatisch grondwatermeetnet van de Vlaamse Milieumaatschappij. Het betreffen gemiddelde EC-waarden voor de periode 2004-2012 (freatisch meetnet) en 2007-2012 (primair meetnet). Per put zijn de filters met een apart symbool weergegeven. De kleur geeft de EC-waarde weer waarbij de blauwe kleuren voor lage EC-waarden staan (zoet tot brak) en de gele tot rode kleur voor hoge EC-waarden (brak tot zout). De kleurschaal is lineair en werd onderverdeeld in gelijke intervallen van 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (met uitzondering van het laatste interval: $> 12.000 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Om de EC-waarden van de peilputten te vergelijken met het 6 Ω m-grensvlak moet het grensvlak omgezet worden naar een EC-waarde. Met behulp van de formule van Archie (1942) en een voor het kustgebied gemiddelde formatiefactor van 4 (Lebbe & Pede, 1986) wordt een waarde verkregen van 8000 μ S/cm. Voor de berekening wordt verwezen naar bijlage 1. Volgens bovenvermelde tabel komt deze waarde overeen met zeer brak water. De diepte van het grensvlak wordt als een groene balk weergegeven op de figuur. De gegevens werden gerangschikt volgens toenemende diepte van het 6 Ω m-grensvlak. Filters boven dit grensvlak moeten dus blauw gekleurd zijn, filters onder dit grensvlak geel tot rood. Op een aantal uitzonderingen na blijkt dit steeds het geval te zijn.

Bijkomend werd ook de diepte van het 1500 mg/l TDS-grensvlak weergegeven op de figuur (blauwe ster). Een waarde van 1500 mg/l TDS komt overeen met 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ of met matig brak water (zie bijlage 1). Aangezien deze EC-waarde beduidend lager ligt dan de EC-waarde van het 6 Ωm -grensvlak, wordt een ondiepere ligging van het 1500 mg/l TDS-grensvlak verwacht. Dit is slechts bij de helft van de putten het geval. Wanneer rekening gehouden wordt met de diepte-klassen van 5 m opgesteld voor het 1500 mg/l TDS-grensvlak, dan vallen meer dan 60% van de 6 Ωm punten binnen een afwijking van 5 m t.o.v. het 1500 mg/l TDS-grensvlak.

Uit de figuur blijkt dat het 6 Ω m-grensvlak goed correleert met de EC-waarden opgemeten in de grondwaterstalen. Waar de correlatie minder goed is vertoont het 1500 mg/l TDS-grensvlak geen systematisch beter resultaat (3-0517, 3-KPS-0001c, 092/21/3).

7.3 Boorgatmetingen en sonderingen

Boorgatmetingen zijn metingen die worden uitgevoerd in open of verbuisde boorgaten. De gekendste metingen die de weerstand van de bodem bepalen zijn *long-* en *short-normal*-metingen (enkel in open boorgaten) en EM-metingen (open en verbuisde boorgaten). Recent worden ook resistiviteitsmetingen via sonderingen uitgevoerd (ECPT's). Zowel boorgatmetingen als EC-sonderingen geven een resistiviteitsbeeld van de ondergrond in hoge resolutie.

In het gebied is een aantal van deze metingen beschikbaar. Deze werden uitgevoerd in opdracht van verschillende instanties waaronder de Vlaamse Overheid (Vlaamse Milieumaatschappij, Agentschap Wegen en Verkeer), Universiteit Gent en de Vlaams Nederlandse Scheldecommissie.

Van elke helikoptermeting is een resistiviteitsprofiel beschikbaar. Dit profiel is ruwer dan een klassieke boorgatmeting, maar laat toe om via eenvoudige statistiek een vergelijking te maken. De statistische methode die wordt gebruikt is de Kendall-correlatietest (Kendall, 1976). Met deze methode wordt de statistische significantie van de correlatie tussen boorgatmeting en helikoptermeting onderzocht. De berekening levert twee resultaten op: een Kendall Tau en een P-waarde. Indien $P \leq 0,05$ is de kans dat de gevonden correlatie aan het toeval te wijten is kleiner of gelijk aan 5%. Daarnaast werd de mate van samenhang berekend met Kendall's Tau. De resulterende waarde ligt altijd tussen de -1 en +1. De waarde 0 betekent geen verband; en hoe dichterbij 1, hoe beter de correlatie. Een goede correlatie wordt in onderstaande tabel weergegeven in groene kleur (tabel 3). De voorwaarde is dat $P \leq 0,05$ en de Kendall's Tau $\geq 0,5$. Hieruit is af te leiden dat er over het algemeen een goede overeenkomst bestaat tussen de helikoptermetingen en de boorgatmetingen/sonderingen.

Tabel 3: P-waarde en Kendall's Tau als waarden voor de statistische significantie van de correlatie tussen de helikoptermetingen en boorgatmetingen/sonderingen. Groene kleur betekent een goede correlatie

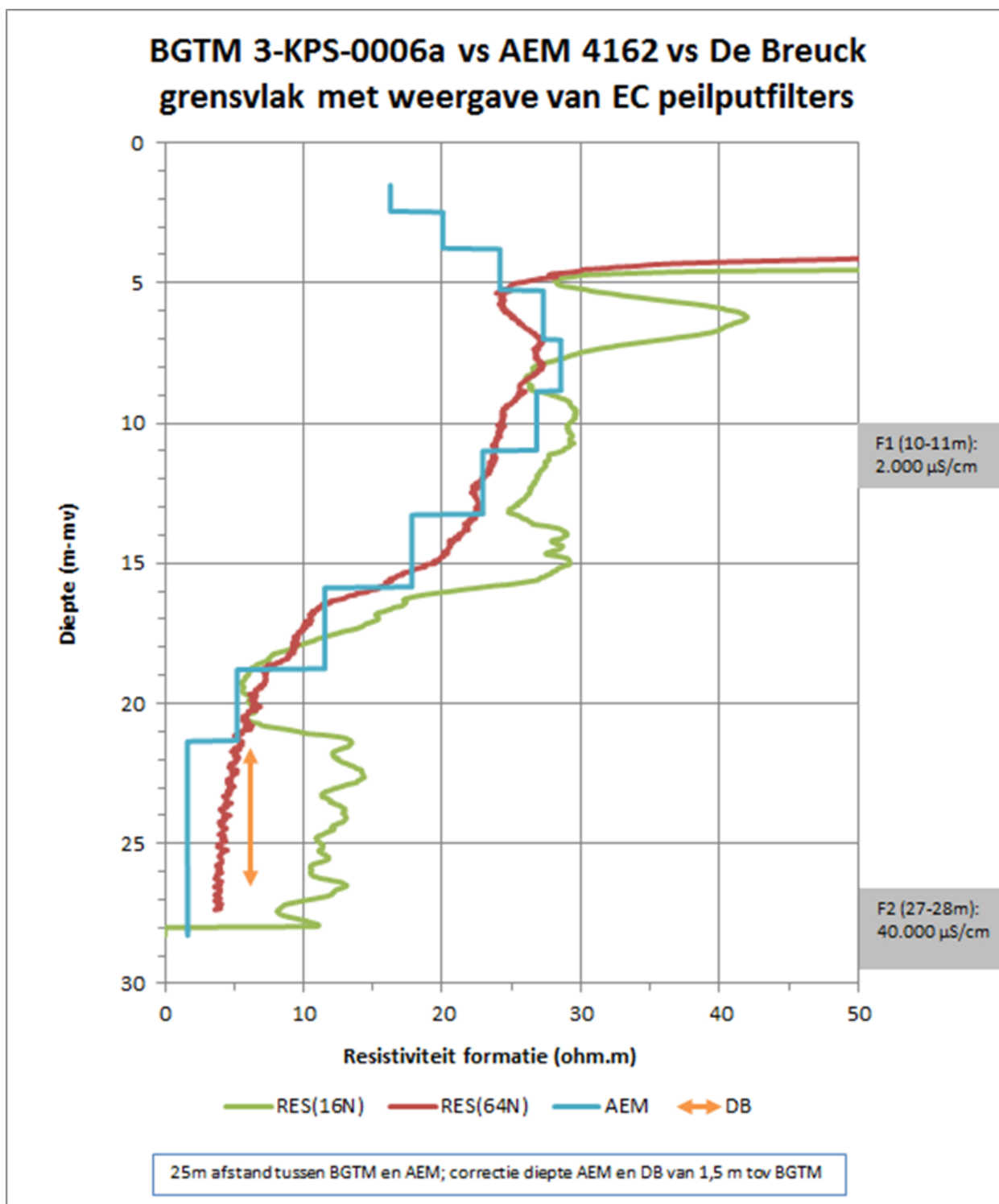
Peilput	Methode1	Methode2	Kendall's Tau ($\geq 0,5$)	P-waarde ($\leq 0,05$)
3-KPS-0001B	AEM	Short normal	0,5	< 2,2e-16
3-KPS-0001B	AEM	Long normal	0,5	< 2,2e-16
3-KPS-0001C	AEM	Short normal	0,6	< 2,2e-16
3-KPS-0001C	AEM	Long normal	0,7	< 2,2e-16
3-KPS-0006A	AEM	Short normal	0,6	< 2,2e-16
3-KPS-0006A	AEM	Long normal	0,9	< 2,2e-16
3-0517	AEM	Short normal	0,5	< 2,2e-16
3-0517	AEM	Long normal	0,3	< 2,2e-16
P1_Z	AEM	EM-sonde	0,7	< 2,2e-16
P2_Z	AEM	EM-sonde	0,3	< 6,15e-3
P2_W	AEM	EM-sonde	0,8	< 2,2e-16

P3_W	AEM	EM-sonde	0,7	< 2,2e-16
P4_Z	AEM	EM-sonde	0,8	< 2,2e-16
P6_W	AEM	EM-sonde	0,2	0,11e-2
P10_W	AEM	EM-sonde	0,6	< 2,2e-16
SA5-08	AEM	ECPT	0,5	< 2,2e-16
SA6-37	AEM	ECPT	0,6	< 2,2e-16
SA6-07	AEM	ECPT	0,4	< 2,2e-16

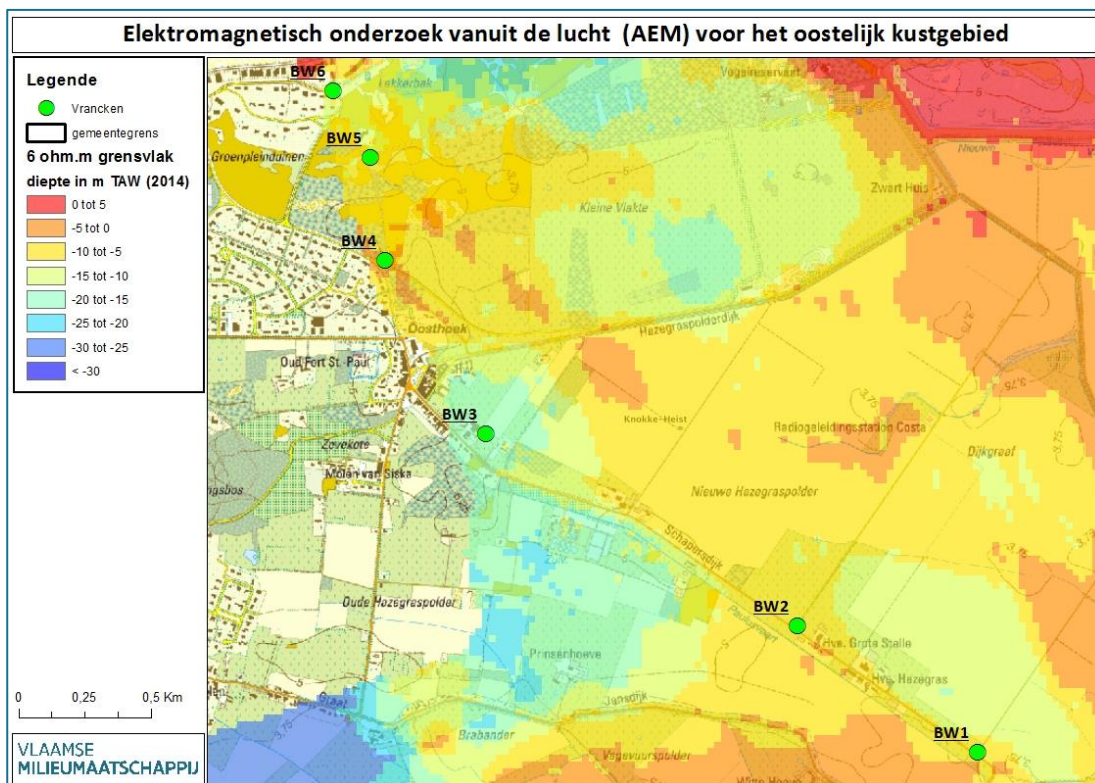
Als voorbeeld wordt 3-KPS-0006A grafisch weergegeven samen met het AEM-resistiviteitsprofiel. Naast de resistiviteiten worden de diepteklasse van het 1500 mg/l TDS-grensvlak weergegeven en de EC-waarden van het grondwater uit de filters (gemiddelde periode 2010-2013). De figuur (figuur 12) toont een goede correlatie tussen helikopter- en boorgatmetingen. Het 6 Ω m-grensvlak bevindt zich op een diepte van ca. 20 m. Het 1500 mg/l TDS-grensvlak ligt ongeveer in hetzelfde interval (20-25 m) maar lijkt op de grafiek dieper te liggen omwille van de hoogtecorrectie. De EC-waarden gemeten in grondwater tonen aan dat het 6 Ω m-grensvlak terug een goede weergave is van het grensvlak tussen zoet en zout grondwater.

De *long normal* (in rood) vertoont een betere correlatie in vergelijking met de *short normal* (in groen). Dit is niet verwonderlijk, omdat de *short normal* beïnvloed wordt door het boorgat en de invasieve zone, terwijl de *long normal* dieper in het sediment meet en hierdoor representatiever is voor de bulkresistiviteit van het omgevende sediment.

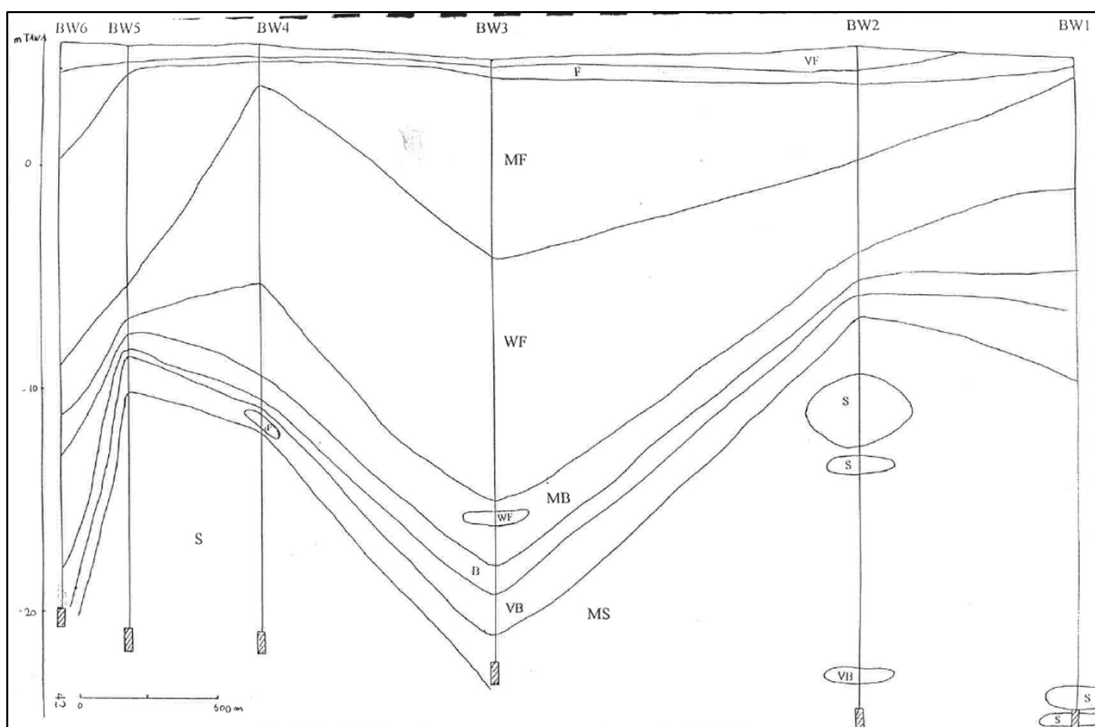
Vrancken (1997) heeft op basis van boorgatmetingen een kwaliteitsverdeling opgemaakt van het grondwaterreservoir te Knokke volgens een noordwest-zuidoost georiënteerde doorsnede (figuur 13). Het 3,5 km-lange profiel werd opgemaakt met behulp van data afkomstig van 6 meetlocaties (BW1 tot BW6). Het AEM-profiel doorheen dezelfde locaties toont een gedetailleerder, maar vergelijkbaar resistiviteitsbeeld (figuren 14 en 15).



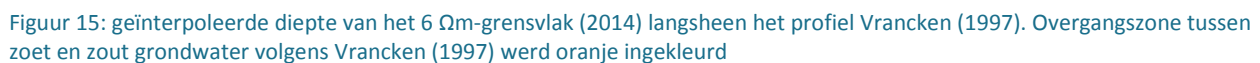
Figuur 12: vergelijking tussen boorgatmeting 3-KPS-0006a, AEM en de oude verziltingskaart (DB) met weergave van EC-waarden peilputfilters



Figuur 13: ligging van de meetpunten uit het onderzoek van Vrancken (1997) met als achtergrond het 6 Ω m-grensvlak in m TAW



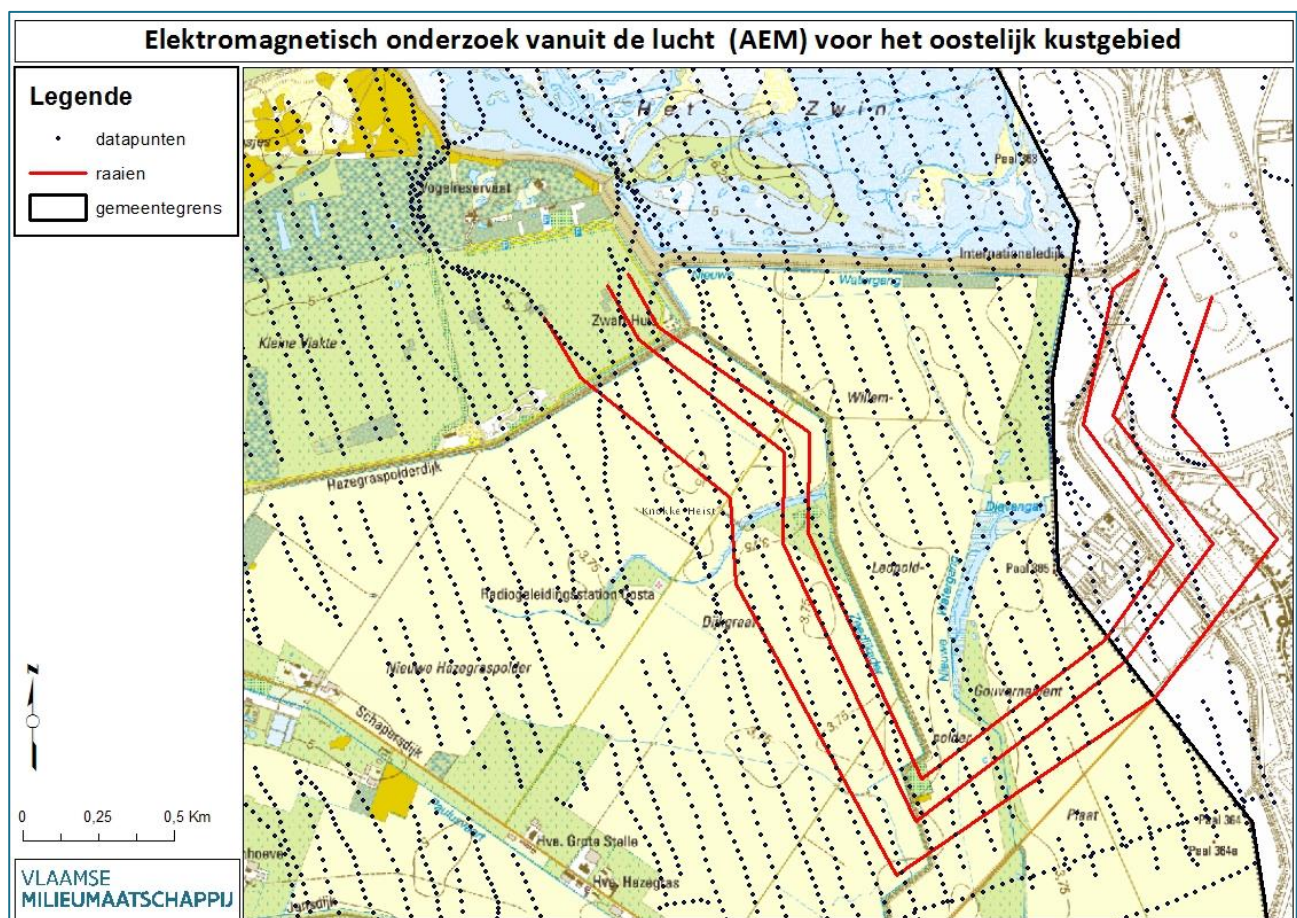
Figuur 14: kopie van het resistiviteitsprofiel opgesteld door Vrancken (1997) op basis van LN-metingen en het classificatiesysteem van De Moor & De Breuck (1969). F: zoet, MF: matig zoet, WF: zwak zoet, MB: matig brak, B: brak, VB: zeer brak, MS: matig zout, S: zout. Verticale schaal in m TAW (0, -10, -20)



Een kopie van de boorgatmeting gebruikt bij het onderzoek van Vrancken (1997) wordt in de linkerzijde van onderstaande figuur weergegeven. Het betreft BW2. Het resistiviteitsprofiel van het dichtstbij gelegen AEM-meetpunt wordt aan de rechterzijde weergegeven. Aangezien de ruwe data van Vrancken (1997) niet beschikbaar zijn, werden beide metingen grafisch vergeleken. Beide metingen vertonen duidelijk hetzelfde resistiviteitsbeeld. De boorgatmeting vertoont een hogere resolutie, maar het globale beeld wordt door de helikopter bevestigd. Op het AEM profiel werd bovendien het 6 Ω m-grensvlak aangeduid (groen), evenals het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood) en het buigpunt (zwart) op de curve. Hieruit blijkt dat het 6 Ω m-grensvlak weinig verschilt van het 1500 mg/l TDS-grensvlak. Het buigpunt blijkt in dit geval niet representatief te zijn voor de zoet-zoutwatergrens zoals gesuggereerd door Vandenbohede *et al.* (2015). Voor een verdere bespreking van de vergelijking tussen het 6 Ω m-grensvlak en de 1.500 mg/l TDS wordt verwezen naar hoofdstuk 10 (evolutie van de verziltingstoestand).

Tabel 4: exploratiedieptes voor Geonics EM-instrumenten (Northwest Geophysical Associates Inc., 2000)

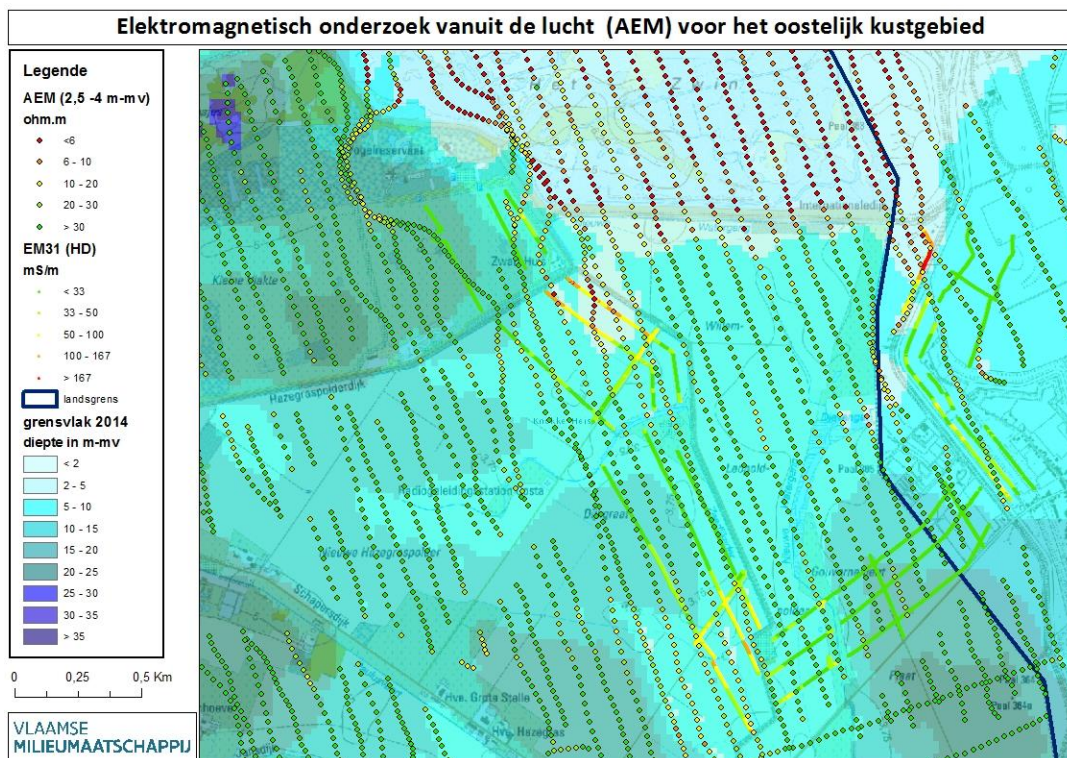
Instrument	Spoelafstand in m	Oriëntatie	Exploratiediepte (m)
EM31	3,7	HD	2,5
EM31	3,7	VD	5,2
EM34	10	HD	6,8
EM34	10	VD	14,3
EM34	20	HD	13,5
EM34	20	VD	28,6
EM34	40	HD	27
EM34	40	VD	57



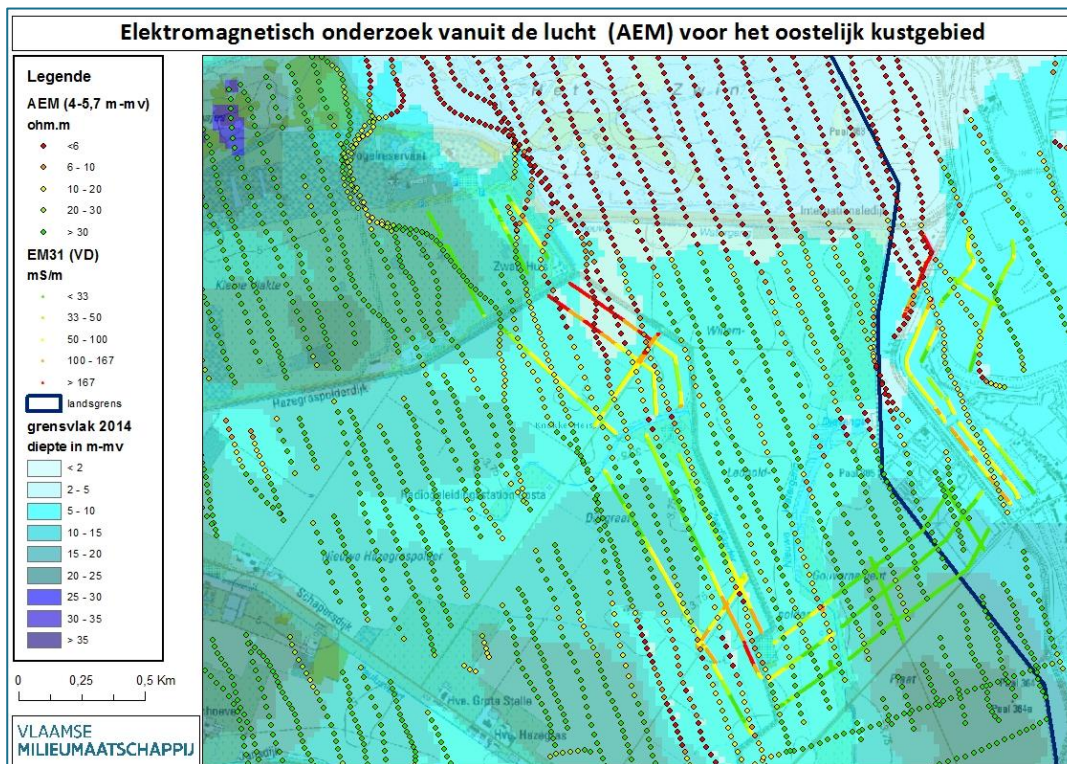
Figuur 17: situering van de raaien waarlangs EM31- en EM34-metingen werden uitgevoerd; lijnen met zwarte punten betreffen de datapunten van de helikopter

Voor het onderzoek nabij het Zwin werden EM31-metingen uitgevoerd in zowel HD als VD configuratie, en EM34 in HD configuratie voor 10, 20 en 40 m spoelafstand. De exploratiediepte bedroeg dus maximaal 27 m, wat ongeveer overeenkomt met de dikte van de freatische aquifer.

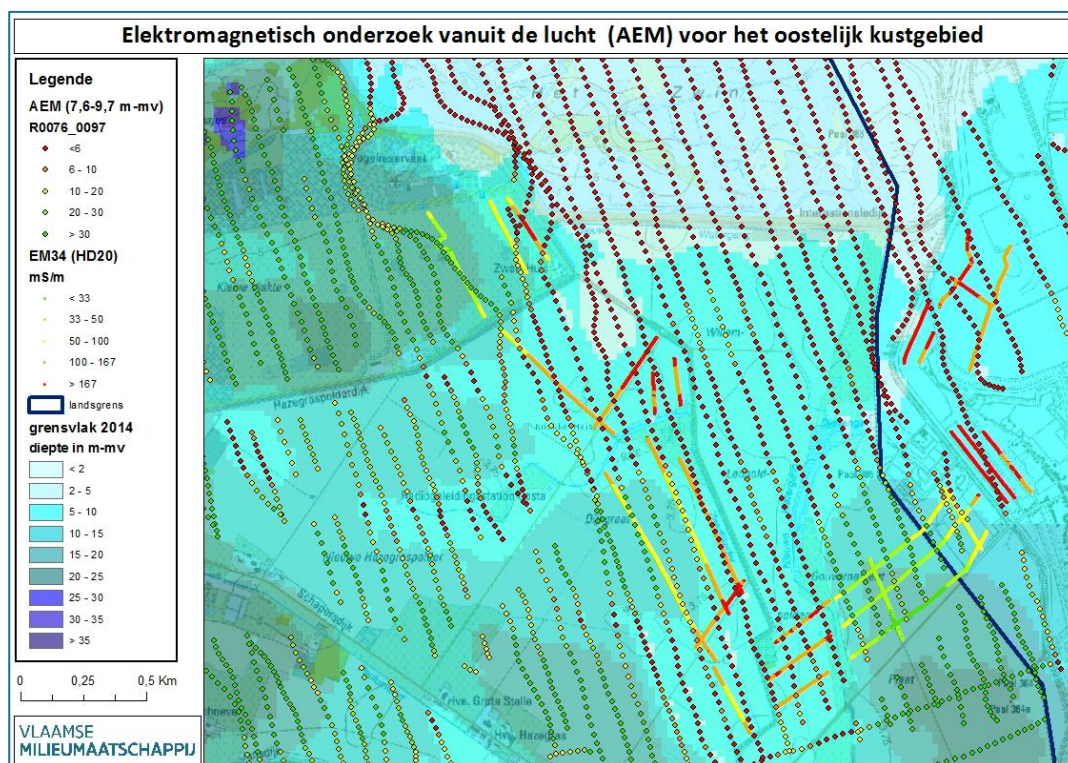
In onderstaande figuren worden de resultaten van de AEM-metingen weergegeven als resistiviteiten in Ωm en de resultaten van de EM31/34-metingen als geleidbaarheden in mS/m (reciproke waarde van resistiviteit). Een vergelijkende tabel met waarden in Ωm en mS/m wordt weergegeven in tabel 5.



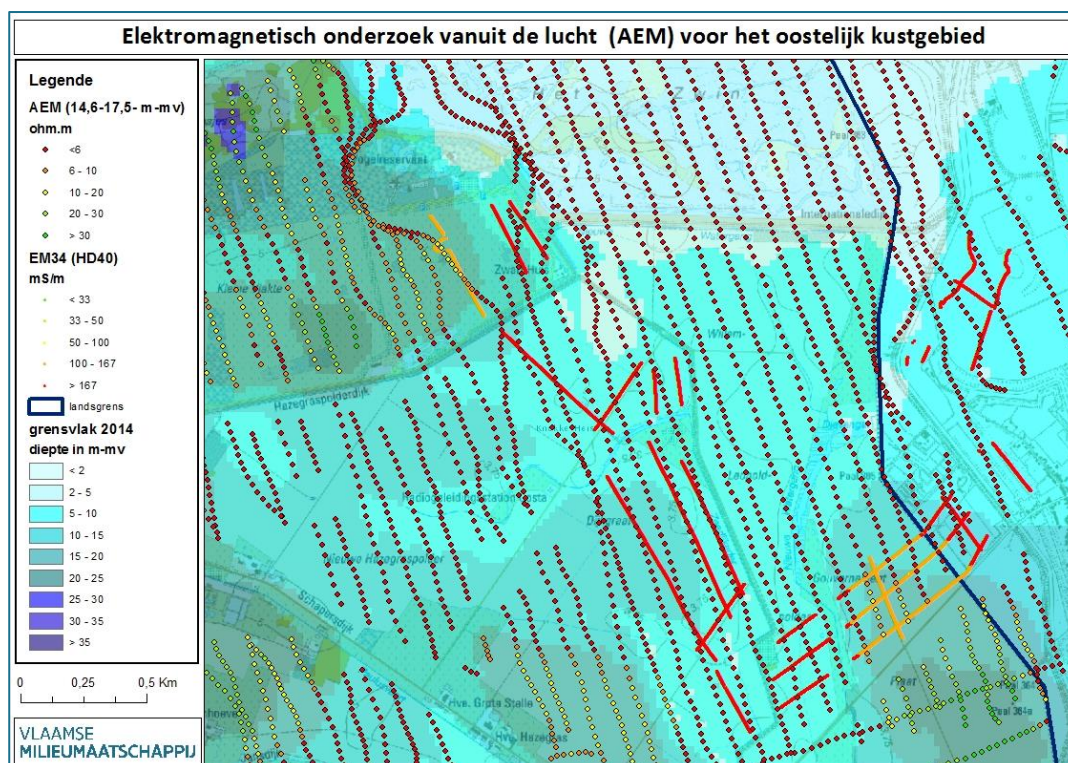
Figuur 18: puntmetingen AEM versus raaien EM31 (HD) met weergave van de diepte van het 6 Ω m grensvlak



Figuur 19: puntmetingen AEM versus raaien EM31 (VD) met weergave van de diepte van het 6 Ω m grensvlak

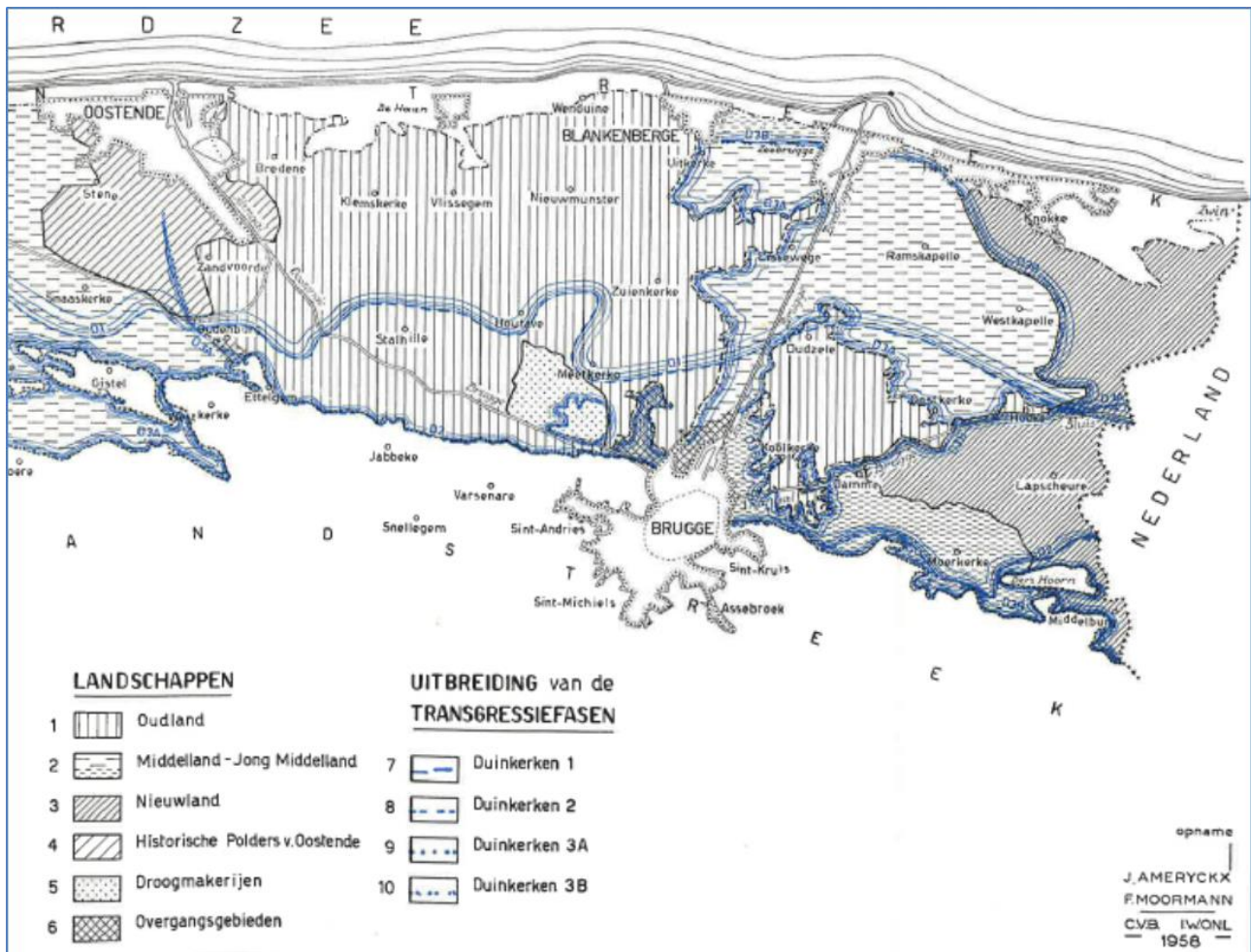


Figuur 20: puntmetingen AEM versus raaien EM34 (HD, 20 m) met weergave van de diepte van het 6 Ω m grensvlak



Figuur 21: puntmetingen AEM versus raaien EM34 (HD, 40 m) met weergave van de diepte van het 6 Ω m grensvlak

laaggelegen poelgronden is vooral merkbaar in het Oudland en in mindere mate in het Middelland (figuur 24). Deze gebieden werden ingepolderd vóór de 13^{de} eeuw waarbij reliëfsinversie zorgde voor het ontstaan van het microreliëf. De kreekruigen fungeren als kleine waterscheidingskammen tussen de polderwaterlopen en worden gekenmerkt door beter ontwikkelde zoetwaterlenzen.



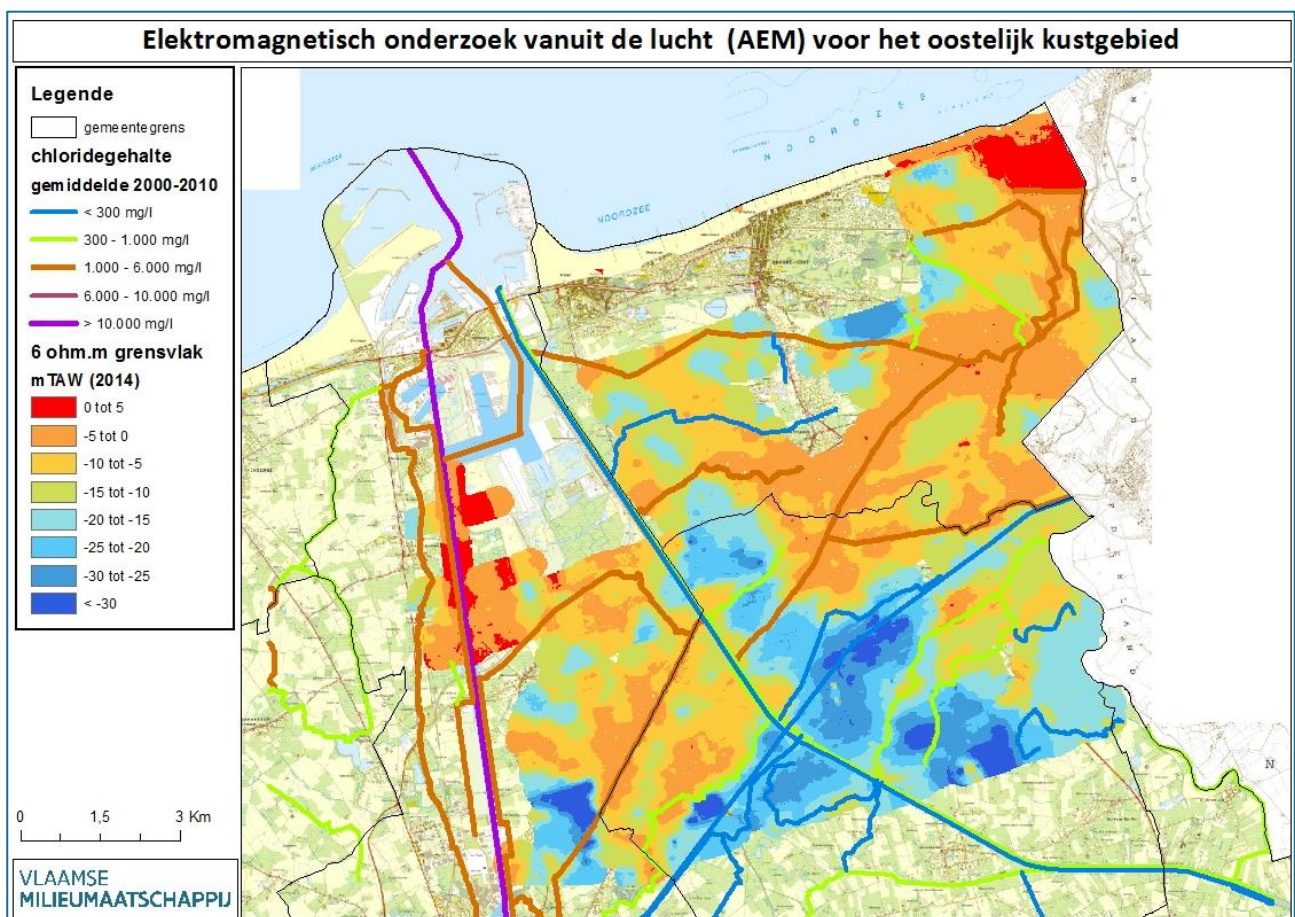
Figuur 24: weergave van de verschillende landschappen en uitbreiding van de transgressiefasen tussen Oostende en de Nederlandse grens (Ameryckx, 1959)

Naast kreekruigen vormen de duinen belangrijke voorkomens van zoet grondwater terwijl ook het gebied dat aanleunt bij de zandstreek een zoet voorkomen kent. Door de dichte bebouwing kon slechts een heel beperkt deel van het duingebied door de helikopter in kaart worden gebracht.

Wanneer we het gemiddelde chloridegehalte (periode 2000-2010, bron: VMM) van de waterlopen uitzetten tegenover de kaart met diepte grensvlak in mTAW (figuur 25) wordt bovenstaand verhaal bevestigd. De polderwaterlopen gelegen in gebied met ondiep grensvlak vertonen een brakke signatuur en draineren zilt grondwater. De kanalen vormen een apart verhaal. Ze vertonen zowel een zoete (Damse Vaart met streefpeil 4,3 à 4,4m TAW; Schipdonkkanaal met streefpeil 3,3 m TAW) als brakke tot zoute

signatuur (Leopoldkanaal met streefpeil 1,5 m TAW, Boudewijnkanaal met streefpeil 3,7m TAW). Waar het gemiddeld kanaalpeil hoger ligt dan het gemiddeld grondwaterpeil en de kanaalbodem en –oever doorlatend zijn, is het kanaal voedend waardoor naargelang de kwaliteit van het kanaalwater een verziltend of verzoetend effect kan optreden. Door aanwezigheid van obstakels waaronder windmolens, kon het Boudewijnkanaal slechts beperkt in kaart worden gebracht. Waar gemeten werd, konden de bevindingen van de oude kaart bevestigd worden: zowel op de linker- als rechteroever van het Boudewijnkanaal wordt het grensvlak ondiep aangetroffen. Omgekeerd wordt langs de Damse Vaart en Schipdonkkanaal voornamelijk een diep grensvlak aangetroffen wat erop zou kunnen wijzen dat beide kanalen een verzoetend effect hebben. Om dit in detail te bestuderen is echter kennis over de doorlatendheid van de bodem en oever van de kanalen vereist. Het Leopoldkanaal is door het laag streefpeil drainerend en kan hierdoor voor een opwaartse stroming zorgen binnenin het grondwaterreservoir.

Verder merken we op dat tijdens droge periodes polderwaterlopen worden bevoeid vanuit de Damse Vaart en vanuit de Ringvaart rond Brugge waardoor sommige waterlopen tijdelijk een zoetere signatuur kunnen vertonen. De vermelde concentraties zijn gemiddelden over een periode van 10 jaar waardoor het effect van deze tijdelijke verzoeting niet doorweegt in de totaalanalyse.



Figuur 25: weergave van het 6 Ω m-grensvlak met gemiddeld chloridegehalte van een aantal belangrijke waterlopen voor de periode 2000-2010 (bron: VMM)

9 DE BARTOON AQUITARD

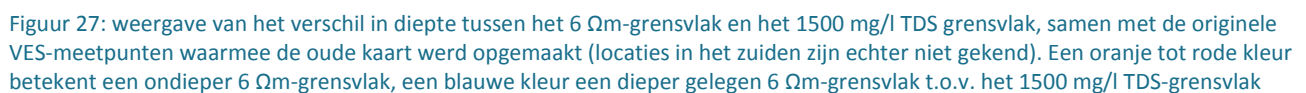
Wanneer we het dieptevoorkomen van de zoetwaterlenzen bekijken merken we dat de zoetwaterlenzen in het zuidwestelijk deel van het projectgebied dieper zijn ontwikkeld. De potentie tot ontwikkeling van diepe zoetwaterlenzen is hier aanwezig aangezien de eerste belangrijke kleilaag in dit gebied, nl. de Paniseliaan aquitard, op grote diepte voorkomt (> 50m-mv). Voor het noordoostelijk deel van het projectgebied is het omgekeerde het geval. De eerste belangrijke kleilaag, de Bartoon aquitard, komt vrij ondiep voor waardoor de ontwikkeling van zoetwaterlenzen gelimiteerd is.

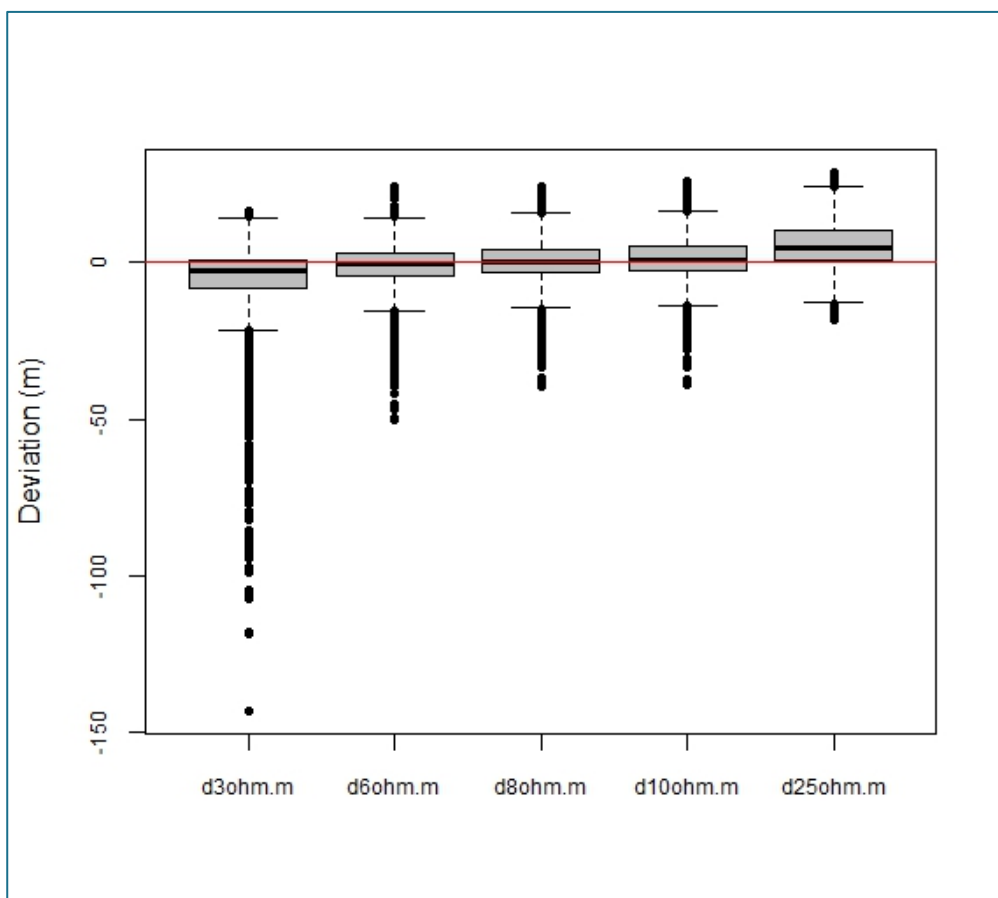
Volgens de HCOV-kartering (VUB, 2005) en de voorlopige resultaten van de H3D-kartering (VITO, 2014) loopt de voorkomingsgrens van de Bartoon aquitard dwars door het studiegebied volgens een zuidoost-noordwest oriëntatie. Deze grens werd ook vastgesteld door de helikoptermetingen (figuur 26). Een duidelijk contrast is merkbaar in het resistiviteitsbeeld tussen het noordoostelijk en zuidwestelijk deel van het projectgebied. De grens tussen beide kan grofweg beschouwd worden als de voorkomingsgrens van de Bartoon aquitard.

Nabij de voorkomingsgrens is de dikte van de laag beperkt (<5m). In noordoostelijke richting neemt de dikte van het Bartoon aquitard toe: ter hoogte van Westkapelle 20m, ter hoogte van het Zwin 55 m. De laag komt voor vanaf een diepte van -20 à -30 m TAW, wat betekent dat zoetwaterlenzen niet dieper kunnen ontwikkelen voor het noordoostelijk gedeelte van het studiegebied. De door de helikopter diepst aangetroffen zoetwaterlens in het noordoostelijk deel van het studiegebied reikt tot -30 m TAW (zie figuur 23) en bevindt zich ten zuidoosten van de drinkwaterwinning van het Gemeentelijk Waterbedrijf Knokke-Heist. Het vormt een zuidelijke uitloper van de belangrijke zoetwaterlens die als gearceerd gebied wordt weergegeven op de oude kaart (figuur 3). Door het dichtbebouwd karakter van het duingebied kon dit gearceerd gedeelte niet opnieuw in kaart worden gebracht.

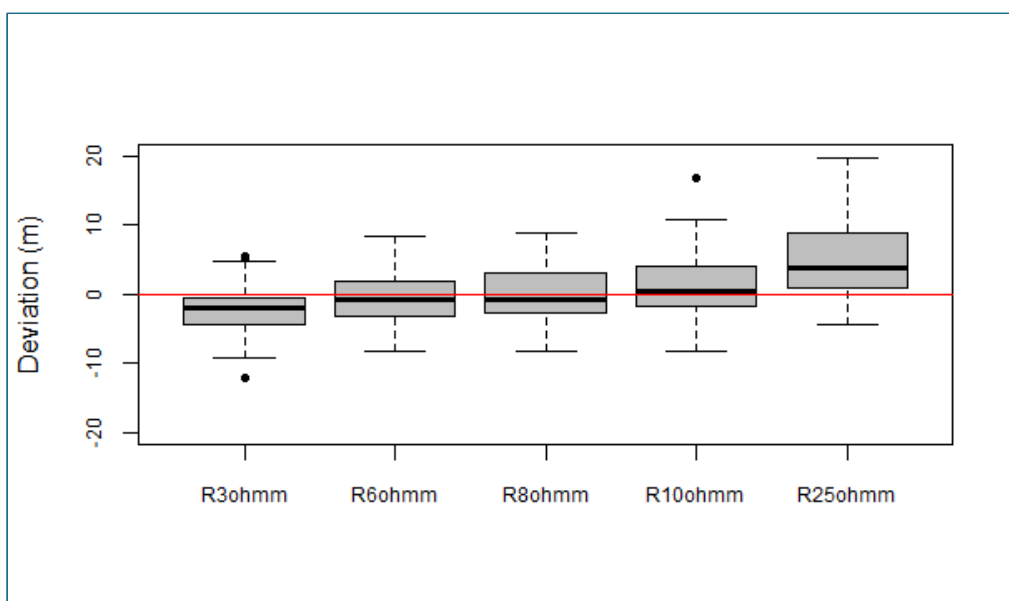
Het door AEM verkregen resistiviteitsbeeld geeft dus niet alleen informatie over het voorkomen van zoetwaterlenzen, het geeft in dit geval ook een beeld van het voorkomen van de aquitard. Na het bereiken van minimale waarden voor de resistiviteit ten gevolge van de hoge saliniteit van het poriënwater aan de basis van het freatisch grondwaterreservoir, wordt een stijging in resistiviteit waargenomen als gevolg van de aanwezigheid van de Bartoon aquitard en de dieperliggende Ledo-Paniseliaan aquifer (zie ook figuur 10 & figuur 23). Deze inversie verschijnt in het zuidwestelijk deel van het studiegebied, waar de Bartoon aquitard afwezig is, pas op een diepte van 80 m. Deze diepte komt overeen met de volgende belangrijke kleilaag, namelijk de Paniseliaan aquitard die de basis vormt van de Ledo-Paniseliaan aquifer.

Het verschil in diepte van het grensvlak tussen de oude en de nieuwe kaart wordt weergegeven op figuur 27. Er zijn zowel positieve (6 Ω m-grensvlak hoger) als negatieve waarden merkbaar (6 Ω m-grensvlak lager); er worden met andere woorden geen uitgesproken negatieve of uitgesproken positieve waarden verkregen. Dit is opmerkelijk gezien er eerder een dieper gelegen grensvlak en dus in hoofdzaak negatieve waarden worden verwacht.

[illegible]



Figuur 29: boxplots van de verschillen tussen het 1500 mg/l TDS-grensvlak en bulkresistiviteiten 3, 6, 8, 10 en 25 Ω m voor alle AEM-datapunten



Figuur 30: boxplots van de verschillen tussen het 1500 mg/l TDS-grensvlak en bulkresistiviteiten 3, 6, 8, 10 en 25 Ω m voor datapunten op minder dan 50 m van een oud meetpunt

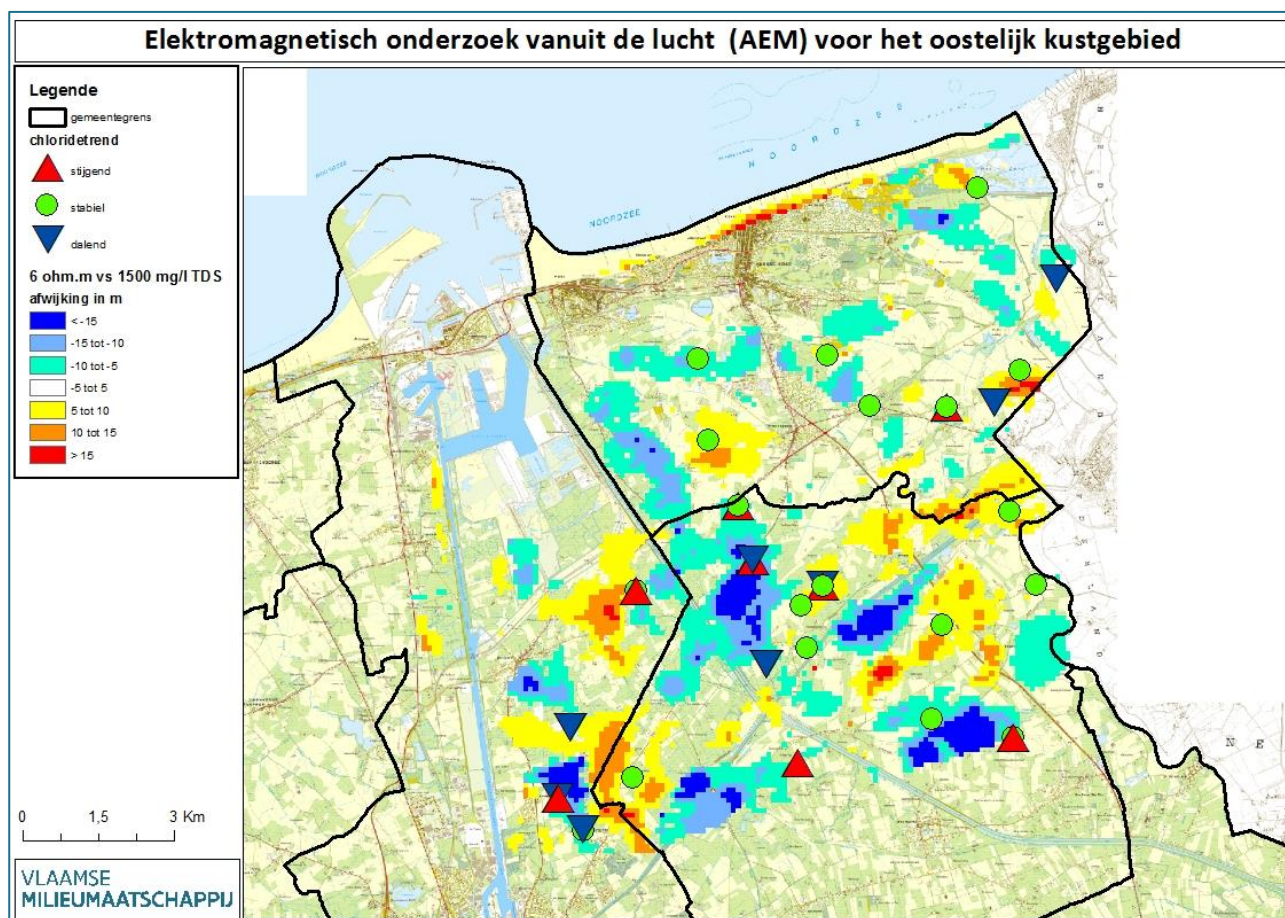
Tabel 6: beschrijvende statistiek voor de verschillen tussen het 1500 mg/l TDS-grensvlak en bulkresistiviteiten 6, 8, en 10 Ωm voor datapunten op minder dan 50 m van een meetpunt gebruikt bij de opmaak van de oude kaart

	6 Ωm	8 Ωm	10 Ωm
Gemiddelde	-0,53	0,23	1,13
Mediaan	-0,70	-0,70	0,43
Standaarddeviatie	3,92	4,13	4,30
1 ^{ste} Quartiel	-3,20	-2,67	-1,69
3 ^{de} Quartiel	1,90	3,06	4,01
Bereik	16,67	17,12	25,12
Minimum	-8,30	-8,30	-8,30
Maximum	8,37	8,82	16,82
Aantal	73	73	73

10.2 Vergelijking met de chloridetrend in grondwater

Trendanalyse van de beschikbare peilputten van de Vlaamse Milieumaatschappij in het gebied (figuur 31), op basis van het chloridegehalte van de voorbije 10 jaar, duidt op een regionaal stabiele situatie voor het ondiepe gedeelte van de aquifer (0-10 m-mv). Volgens de methode van Kendall (zie eerder bij validatie van de metingen) vertoont het grootste deel van de populatiefilters (59%) geen significante trend. De overige peilputfilters vertonen eerder een significant dalende trend (24%) tegenover 17% significant stijgende trends voor chloride.

Er is geen duidelijke correlatie waarneembaar tussen de ligging van de putten met significant stijgende of dalende trend en de plaatselijke afwijkingen tussen de helikoptermetingen en de originele verziltingskaart. Hierbij moet opgemerkt worden dat de trends over een kortere periode zijn berekend (10 jaar) dan het tijdsverloop tussen de twee karteringen (ca. 50 jaar). In de zones waar de grootste verschillen optreden vertonen de aanwezige putten over het algemeen geen significante trend. Voor het diepere gedeelte van de aquifer zijn te weinig gegevens voorhanden om een trend in chloridegehalte te bepalen.



Figuur 31: weergave van het verschil in diepte tussen het 6 Ω m-grensvlak en het 1500 mg/l TDS grensvlak, samen met de chloridetrend van peilputfilters in het projectgebied

10.3 Bespreking van de verschillen

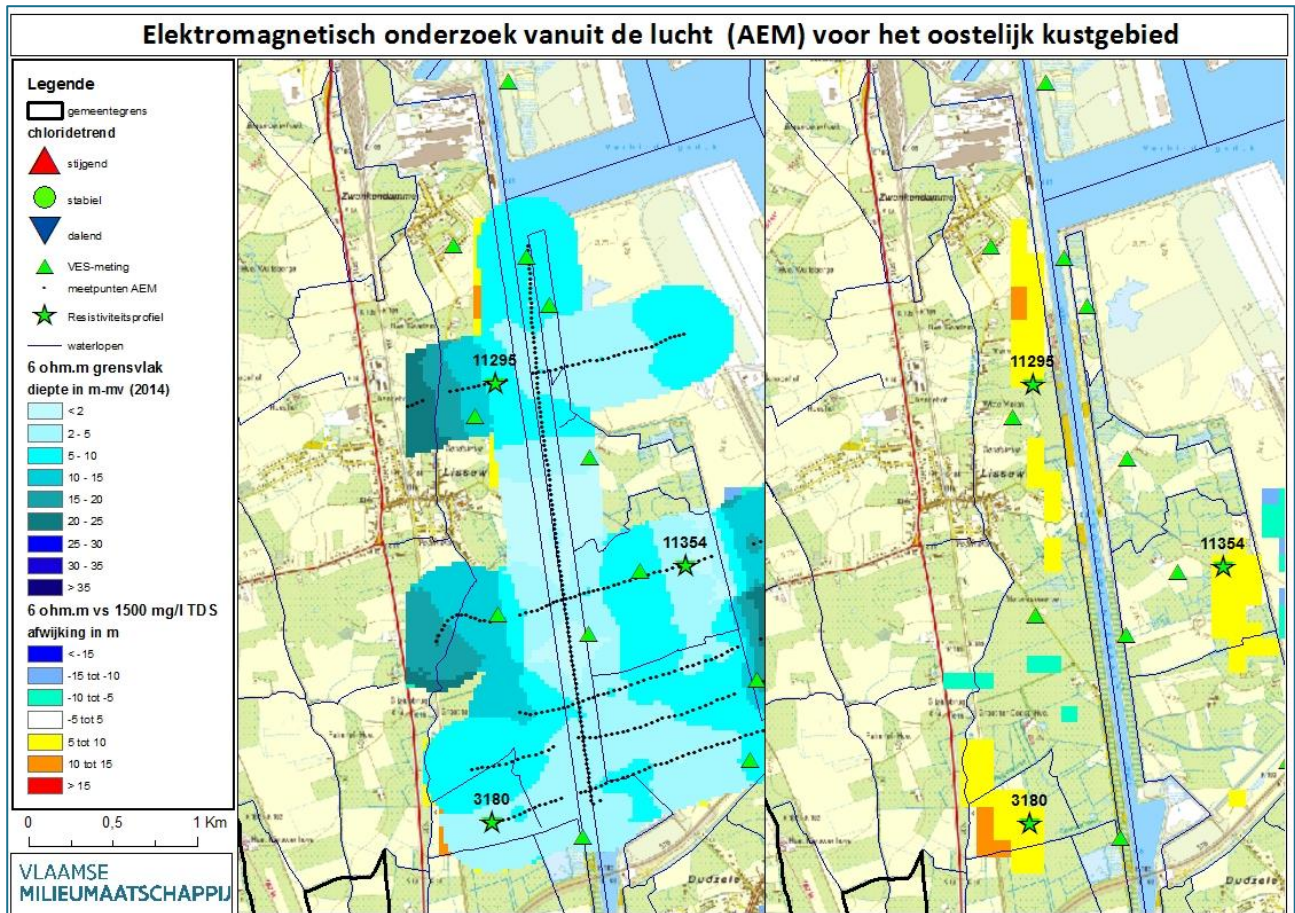
Niettegenstaande de helikoptermetingen aantonen dat de verziltingstoestand in zijn globaliteit stabiel is gebleven, zijn er lokaal enkele duidelijke verschillen met de oude verziltingskaart merkbaar. De bespreking gebeurt per gemeente. Waar een belangrijk verschil wordt vastgesteld wordt een kaart weergegeven met de diepte van het grensvlak in m-mv aan de linkerzijde en een verschilkaart tussen het nieuw en oud grensvlak aan de rechterzijde. Meetpunten van de helikopter worden als zwarte puntjes weergegeven. Van een aantal van deze meetpunten wordt een resistiviteitsplot weergegeven in de tekst. De ligging van deze resistiviteitsplots wordt op de kaart aangeduid met een groene ster en bijhorend nummer. VES-metingen gebruikt bij de opmaak van de oude kaart worden met een groene driehoek weergegeven. Voor de chloridetrend van de peilputten is een aparte symboliek in de legende vermeld.

10.3.1 Grondgebied Brugge

10.3.1.1 Westelijke oever Boudewijnkanaal

Wegens het grote aantal obstakels langs het kanaal kon slechts over bepaalde delen gevlogen worden. Er zijn vijf dwarse vluchtlijnen beschikbaar en één parallelle vluchtlijn (figuur 32). Waar gemeten werd,

konden de bevindingen van de oude kaart bevestigd worden: zowel op linker- als rechteroever van het Boudewijnkanaal wordt het grensvlak ondiep aangetroffen. Aanvullende onderzoeksmethodes zijn echter noodzakelijk om een volledig beeld van de verziltingstoestand van het Boudewijnkanaal te verkrijgen.

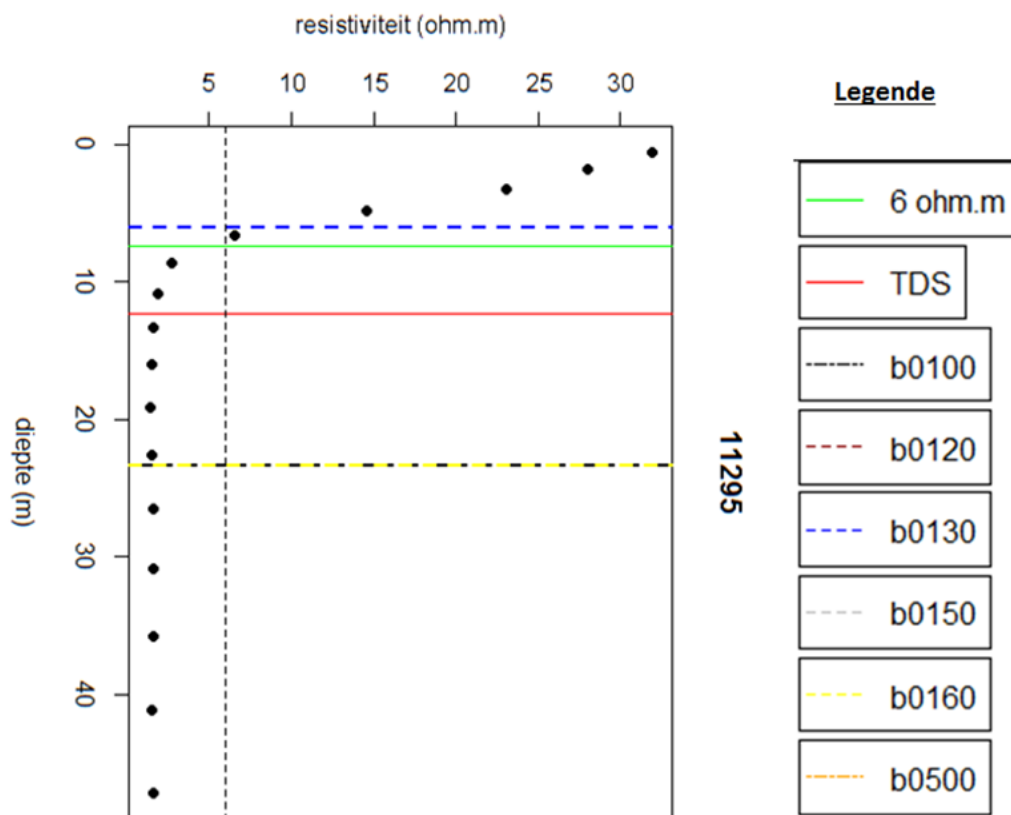


Figuur 32: situatie ter hoogte van het Boudewijnkanaal (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak; zie legende)

In zones waar belangrijke verschillen optreden met de oude kaart ontbreken meetpunten zodat rekening moet gehouden worden met interpolatieverschillen als belangrijkste oorzaak van het verschil tussen beide kaarten.

Waar meetpunten van de helikopter beschikbaar zijn, zoals bij de twee noordelijke dwarssecties op de westelijke oever ter hoogte van Witte Molen en Monnikenwerve, wordt geen belangrijk verschil met de oude kaart vastgesteld. De verziltingssituatie lijkt hier dus stabiel te zijn. Vanaf het Boudewijnkanaal richting westen is een strook van 400 m met ondiep grensvlak merkbaar. Een meetpunt (11295) uit de dwarssectie Witte Molen wordt verduidelijkt op figuur 33.

Ter hoogte van de zuidelijke secties (hoeve Ter Doest tot Herdersbrug) is de verzilting op de westelijke oever breder: het betreft een strook van minstens 600 m. Dit is iets breder dan aangegeven op de oude kaart (zie figuur 34), maar meetpunten van de oude kaart ontbreken in deze zone zodat interpolatieverschillen de oorzaak kunnen zijn. Dit gebied omvat niet toevallig het natuurreservaat Ter Doest waar zilte kwel voorkomt. De resistiviteitsplot van meetpunt 3180 wordt weergegeven in figuur 34.



Figuur 33: resistiviteitsplot ter hoogte van Witte Molen (Lissewege) op de westelijke oever Boudewijnkanaal. Naast de resistiviteit zijn het 6 Ω m-grensvlak (groen), het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood) en de basis van verschillende HCOV-eenheden³ weergegeven (0100: Quartaire afzettingen, 0120: duinen, 0130: polderafzettingen, 0150: deklagen, 0160: pleistocene afzettingen, 0500: Bartoon aquitard). Deze legende is van toepassing op alle volgende figuren met resistiviteitsplot. De 6 Ω m-waarde op de X-as wordt als zwarte stippellijn weergegeven. Waar deze lijn de resistiviteitsplot snijdt wordt de diepte van het 6 Ω m-grensvlak afgeleid. Het 6 Ω m-grensvlak bevindt zich in dit geval ondieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak, maar het verschil is kleiner dan 5 m. Aangezien de diepte van het grensvlak op de oude kaart wordt weergegeven met intervallen van 5 m worden verschillen met de nieuwe kaart kleiner dan 5 m niet als significant beschouwd

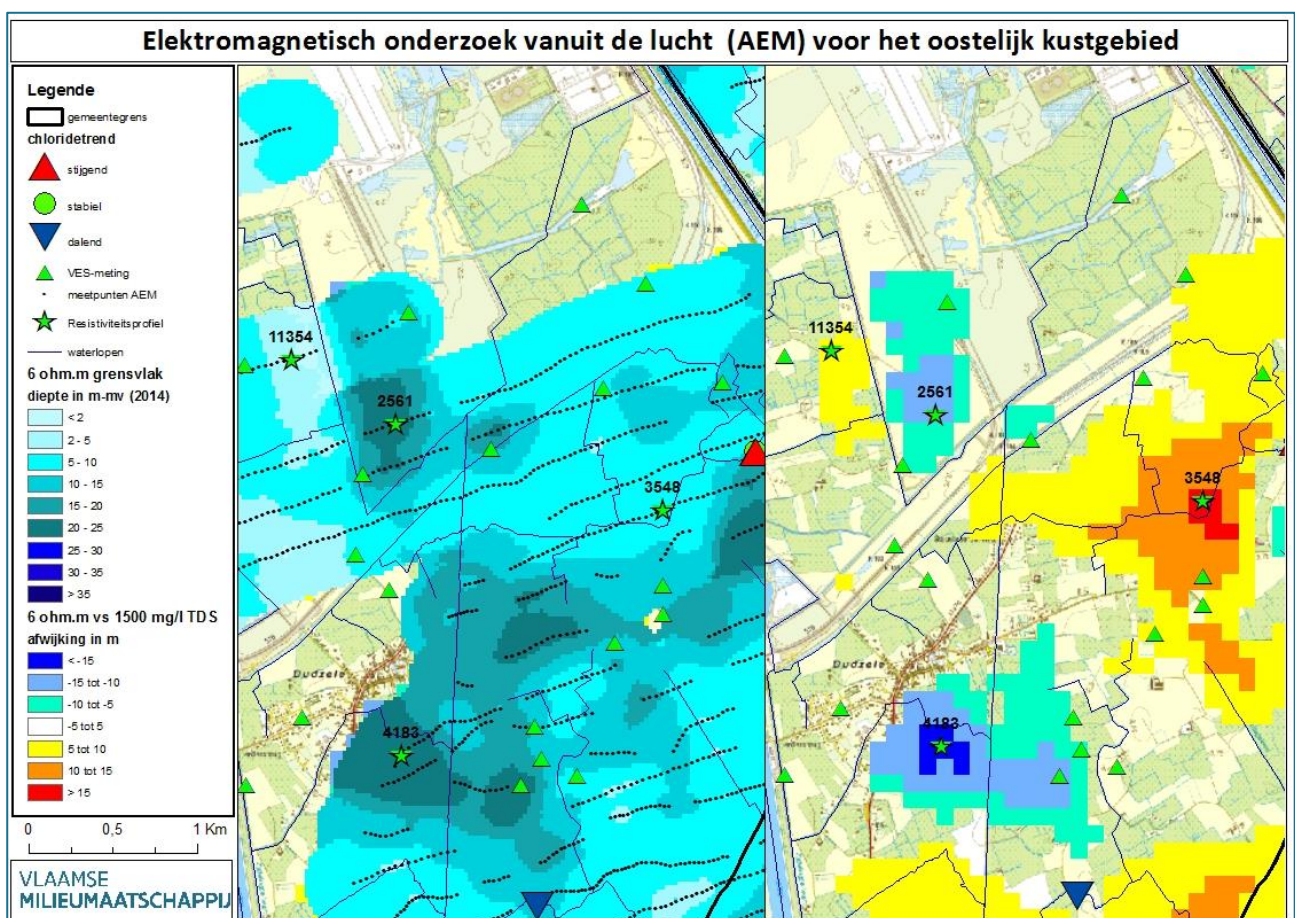
³ Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen (<https://dov.vlaanderen.be/dovweb/html/3hcov.html>)



10.3.1.2 Achterhaven en Dudzele

Het proces van ontwikkeling van zoetwaterlenzen in het havengebied, gepaard gaande met zilte kwel in de lagergelegen polders, werd reeds in het verleden met een grondwatermodel voorspeld (Vandenbohede & Lebbe, 2002; Belconsulting N.V., 2008). De helikoptermetingen bevestigen de modelresultaten. De zilte kwel is bovendien het sterkst nabij de polderwaterlopen. Om dit proces van nabij op te volgen is aanvullende monitoring aangewezen.

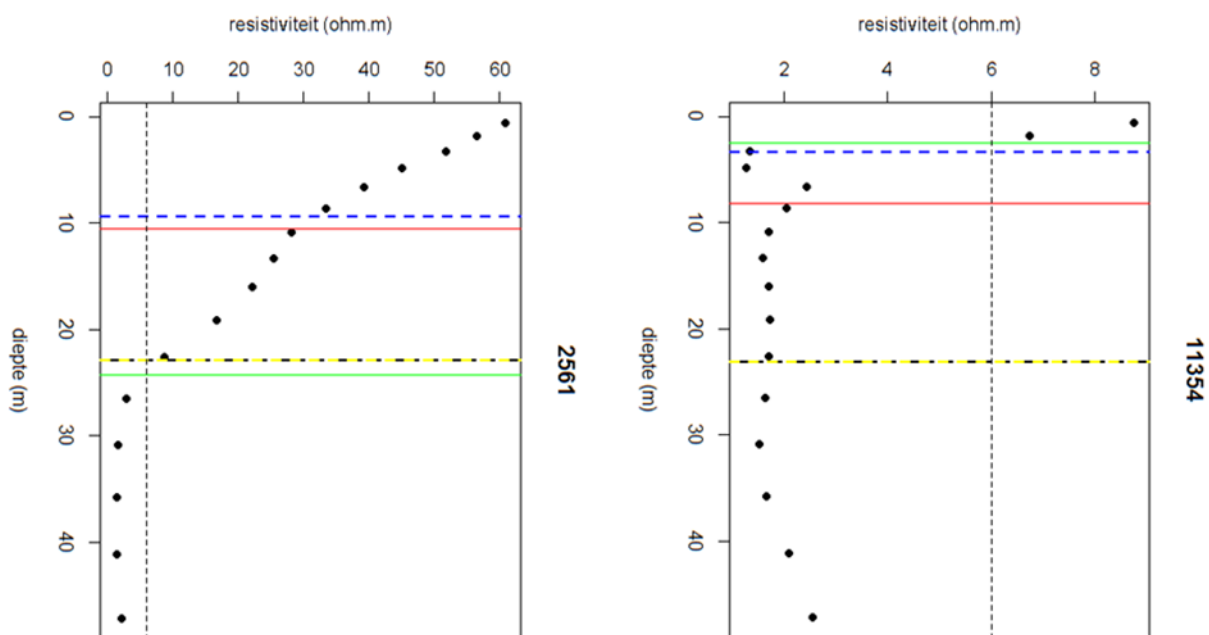
Uit gegevens van de Vlaamse Landmaatschappij in het kader van het project 'Ecologische advisering en monitoring poldercomplex (uitgevoerd in samenwerking met INBO in opdracht van AMT)' blijkt dat het grensvlak ter hoogte van de uitgeveende gronden in de Dudzeelse polder nabij het maaiveld voorkomt (ca. 2m TAW). De nieuwe kaart toont een gelijkaardig beeld nabij het Boudewijnkanaal en nabij de opgehoogde zone (0 tot 5 m TAW), maar centraal in het gebied wordt de diepte van het grensvlak overschat (0 tot -5 mTAW). Dit komt door interpolatie tussen de twee vluchtlijnen die gedeeltelijk een kreekrug met dieper grensvlak hebben aangesneden. De vluchtlijnen liggen hier 600 m uit elkaar, terwijl dit voor het grootste deel van het projectgebied 250 m is. Het effect van de interpolatie weegt hier dus zwaarder door wegens het gebrek aan voldoende datapunten (zie ook figuur 32).



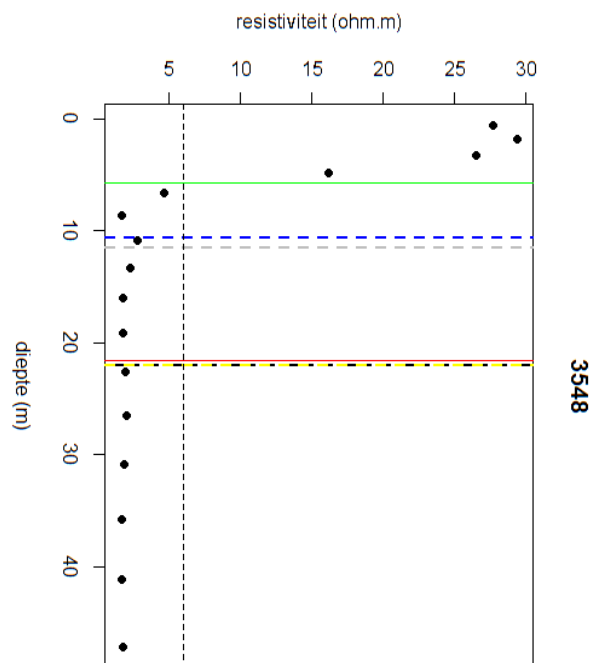
Figuur 35: situatie ter hoogte van achterhaven (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



Verziltingstoestand van het oostelijk kustgebied



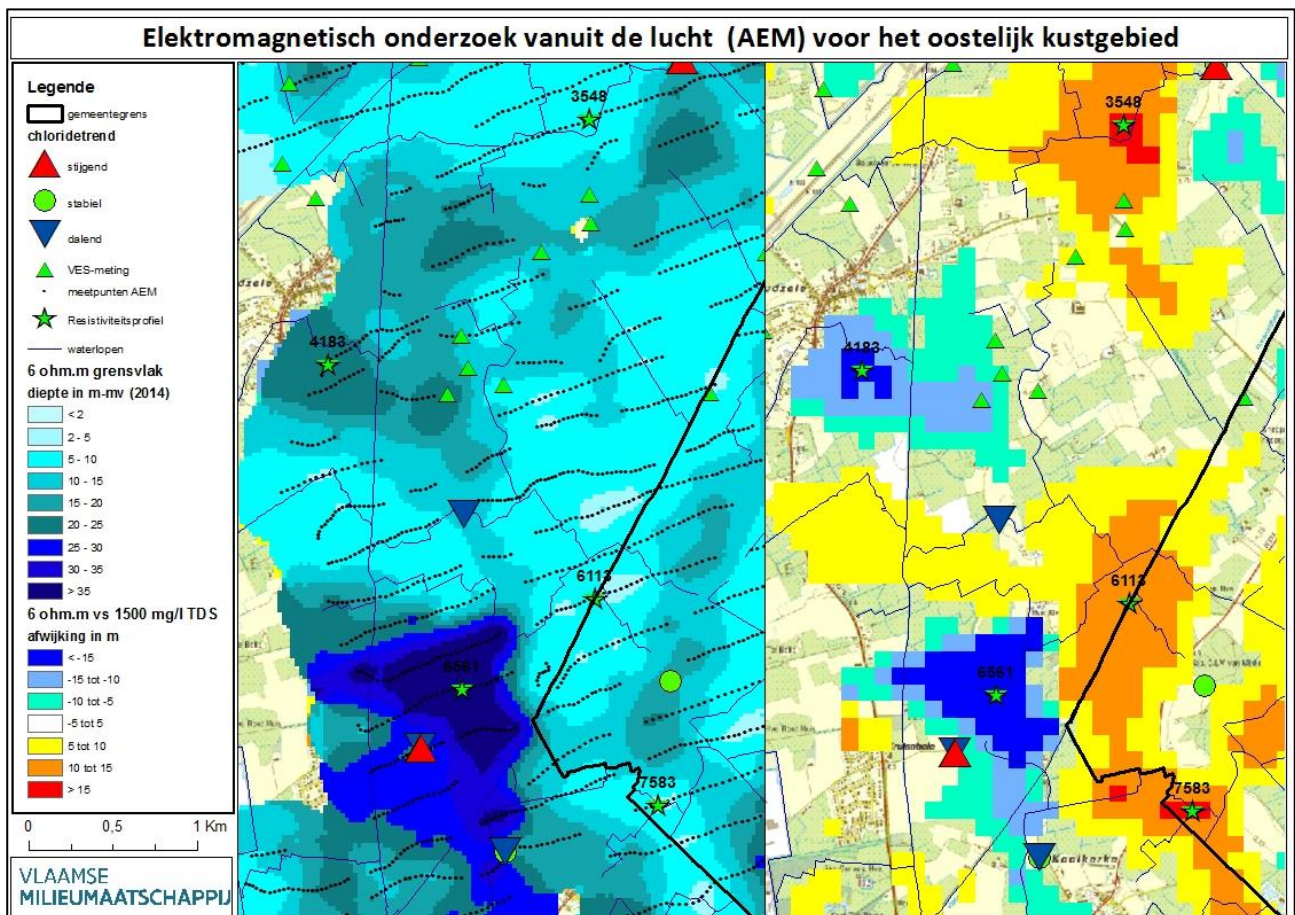
Figuur 37: resistiviteitsplot ter hoogte van opgehoogde zone achterhaven (links) met diep 6 Ω m-grensvlak en resistiviteitsplot ter hoogte van Dudzeelse polder (rechts) met zeer ondiep 6 Ω m grensvlak. Voor de legende, zie figuur 33



Figuur 38: resistiviteitsplot ter hoogte van polder ten zuiden achterhaven (Dudzele). Het 6 Ω m-grensvlak (groen) bevindt zich ondieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Deze laatste komt overeen met de basis van het Quartair. Voor de legende wordt verwezen naar figuur 33

10.3.1.3 Polders tussen Dudzele en Koolkerke

Van noord naar zuid hebben we een zone met dieper grensvlak (Dudzele dorp, meetpunt 4183), een zone met ondieper grensvlak dat zich oostelijk uitbreidt langs de grens met Damme (meetpunt 6113), en terug een zone met dieper grensvlak (Kruisabele-Koolkerke, meetpunt 6561). Deze ruimtelijke verdeling lijkt zich te spiegelen aan de bodemkaart waar we respectievelijk te maken hebben met een kreekrug, een poelgrond en terug een kreekrug. Waar belangrijke kreekruggen aanwezig zijn, kunnen zoetwaterlenzen zich uitbouwen door het goed doorlatend karakter en het hoger drainageniveau. Dit is niet het geval voor poelgronden waar het drainageniveau lager is en de doorlatendheid slecht. De ziltere zone houdt terug verband met de aanwezigheid van polderwaterlopen en meer specifiek de Ronselarebeek (Ronsaardbeek) op de grens met Damme. De polderwaterlopen draineren en zorgen voor het lokaal optreden van zilte kwel. Metingen van de oude kaart zijn in deze zones niet gekend. Het is daarom onduidelijk of het verschil met de oude kaart te wijten is aan een interpolatieverschil of een verschuiving van het grensvlak. Monitoring is aangewezen om deze zones op te volgen.

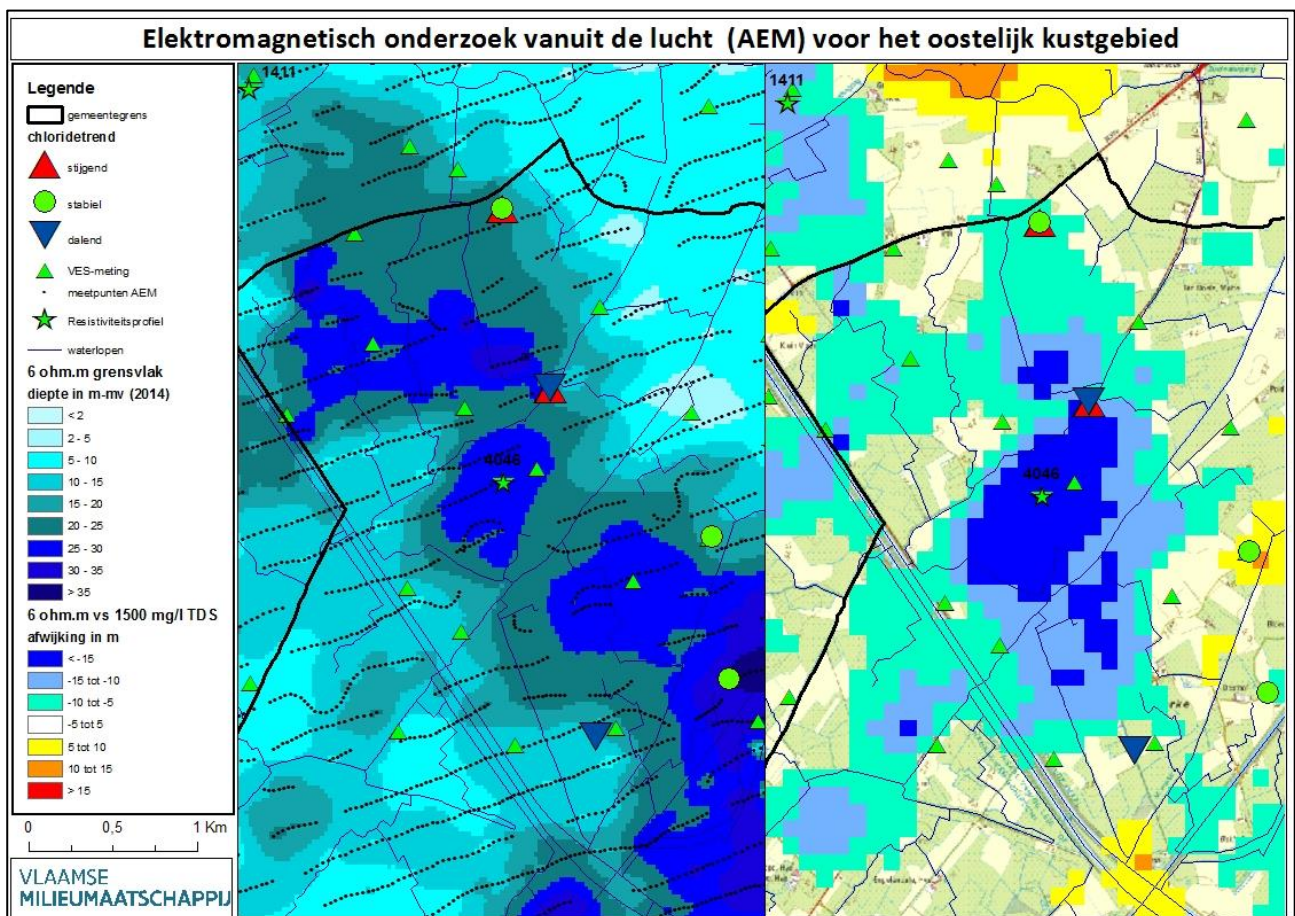


Figuur 39: situatie ter hoogte van Dudzele-Koolkerke (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)

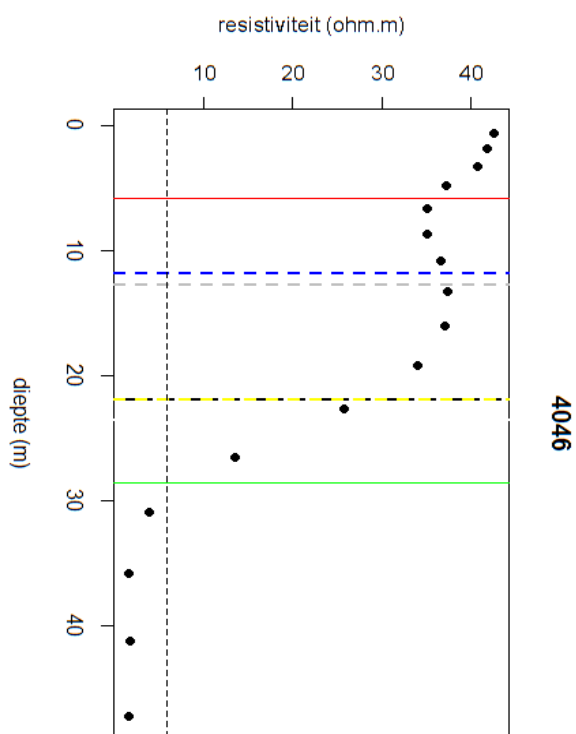
10.3.2 Grondgebied Damme

10.3.2.1 Zoetwaterlens te Oostkerke

Het 6 Ω m-grensvlak te Oostkerke is dieper in vergelijking met de oude kaart. Dit kan wijzen op een verdere uitbouw van de zoetwaterlens sedert de vorige kartering. Er is één meetpunt van de oude kaart in deze zone gekend. Dit gebied ligt op de grens tussen Oud- en Middelland, en wordt gekenmerkt door reliëfs-inversie waarbij kreekruggen boven het landschap uitsteken. De ontwikkeling van grote zoetwaterlenzen is hier dus mogelijk, mede door het ontbreken van de Bartoon klei.



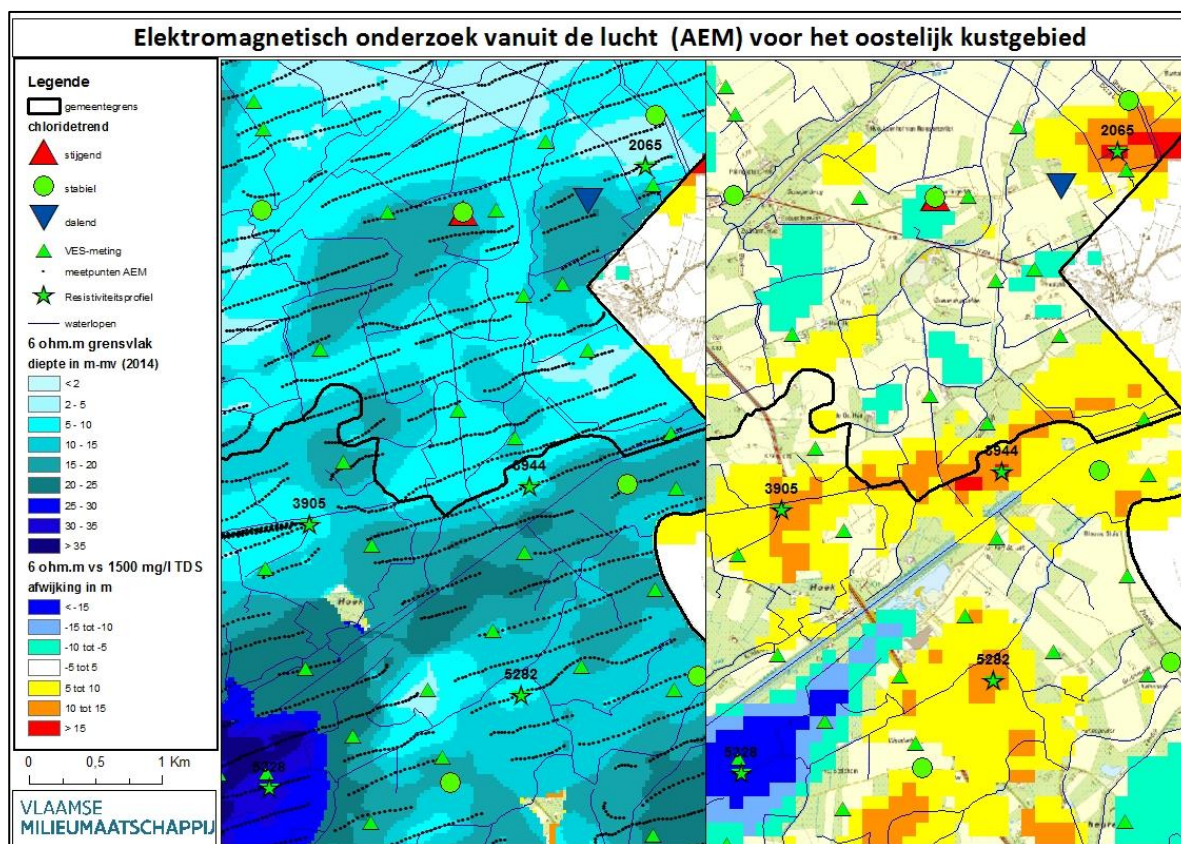
Figuur 41: situatie ter hoogte van Oostkerke (links diepte 6 Ω m grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



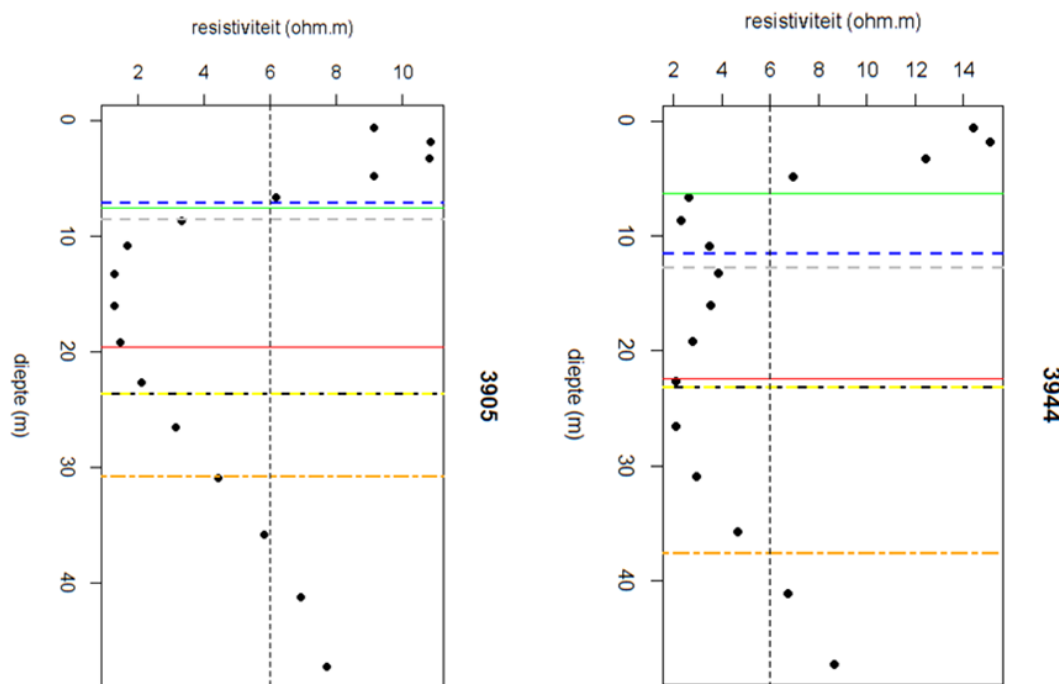
Figuur 42: resistiviteitsplot ter hoogte van Braambeierhoek (Oostkerke). Het 6 Ω m-grensvlak (groen) bevindt zich aanzienlijk dieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Voor de legende, zie figuur 33

10.3.2.2 Noordelijke oever Damse Vaart (Hoeke)

In het oostelijk gedeelte van Damme, ten noorden van de Damse Vaart, bevindt zich een zone met ondieper grensvlak in vergelijking met de oude kaart. Centraal in deze zone loopt de Hoekevaart die drainerend werkt en lokaal voor zilte kwel zorgt. Het verschil met de oude kaart kan hierdoor te wijten zijn aan verschillen in interpolatie daar de oude kaart minder meetpunten ter beschikking had en de lokale zilte kwel niet steeds kon detecteren.



Figuur 43: situatie ter hoogte van Hoeke (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)

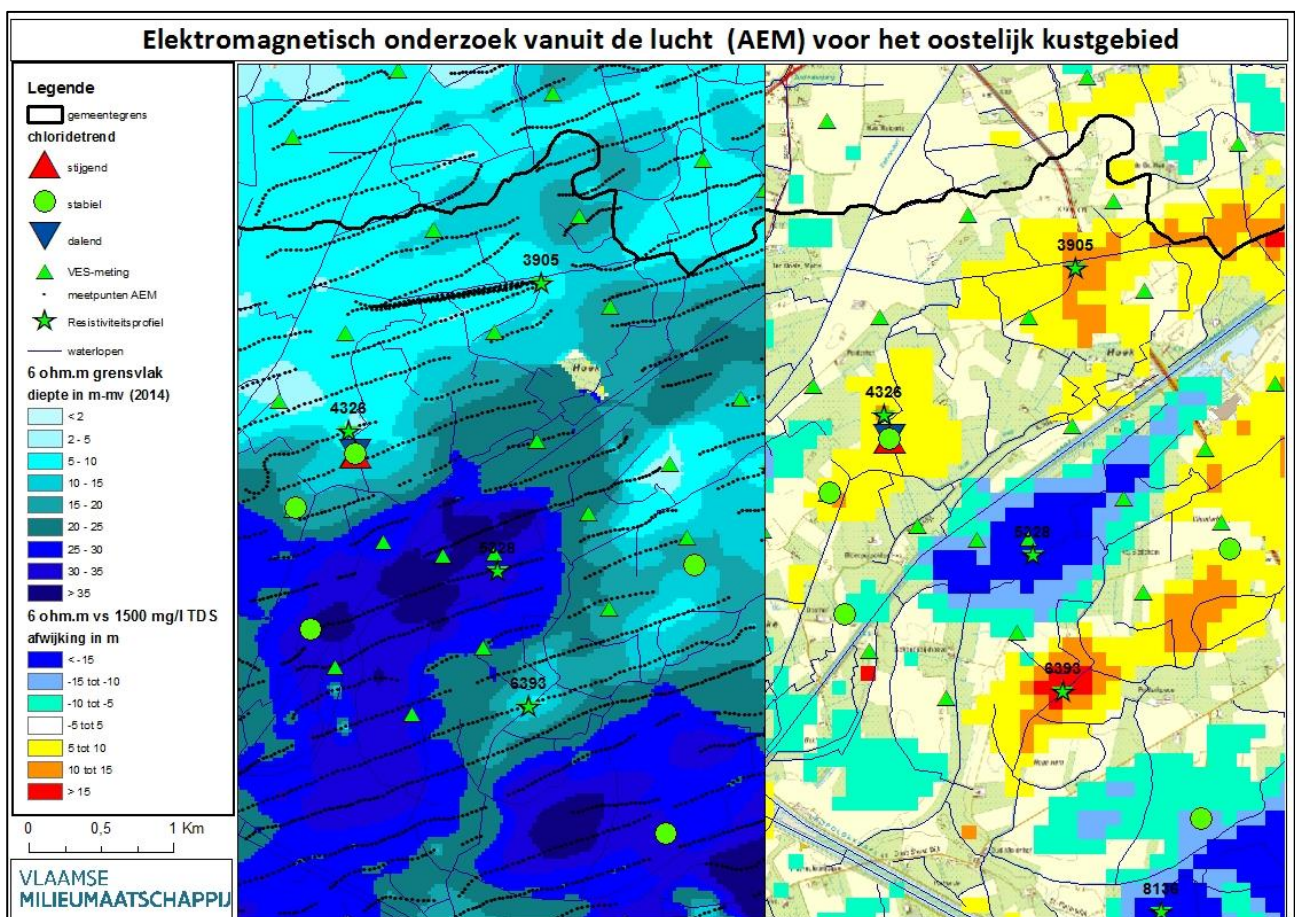


Figuur 44: resistiviteitsplot nabij Hoekemolen (links) en nabij Zwarte Sluis (rechts). Het 6 Ωm-grensvlak (groen) bevindt zich in beide gevallen ondieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Voor de legende, zie figuur 33

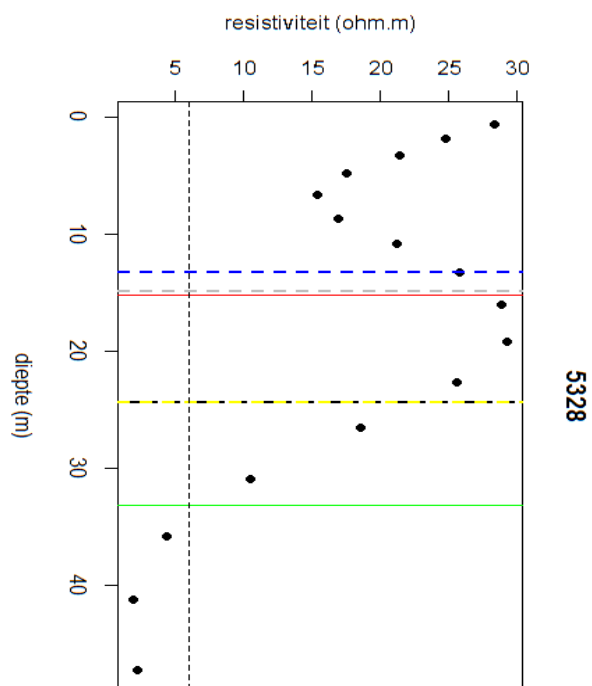
10.3.2.3 Damme en Lemspolder

Het grensvlak komt dieper voor in vergelijking met de oude kaart. Zowel Damme als een deel van de Lemspolder (gelegen tegen de Damse Vaart) liggen topografisch hoger ($> +4\text{mTAW}$) dan het omliggend poldergebied wat oorzaak kan zijn van een diepere ontwikkeling van zoetwaterlenzen. Beide locaties liggen bovendien buiten het voorkomensgebied van de Bartoonklei zodat de eerste belangrijke kleilaag de Paniseliaanklei betreft. Hierdoor kunnen zoetwaterlenzen zich dieper ontwikkelen in vergelijking met het oostelijk deel van het grondgebied Damme.

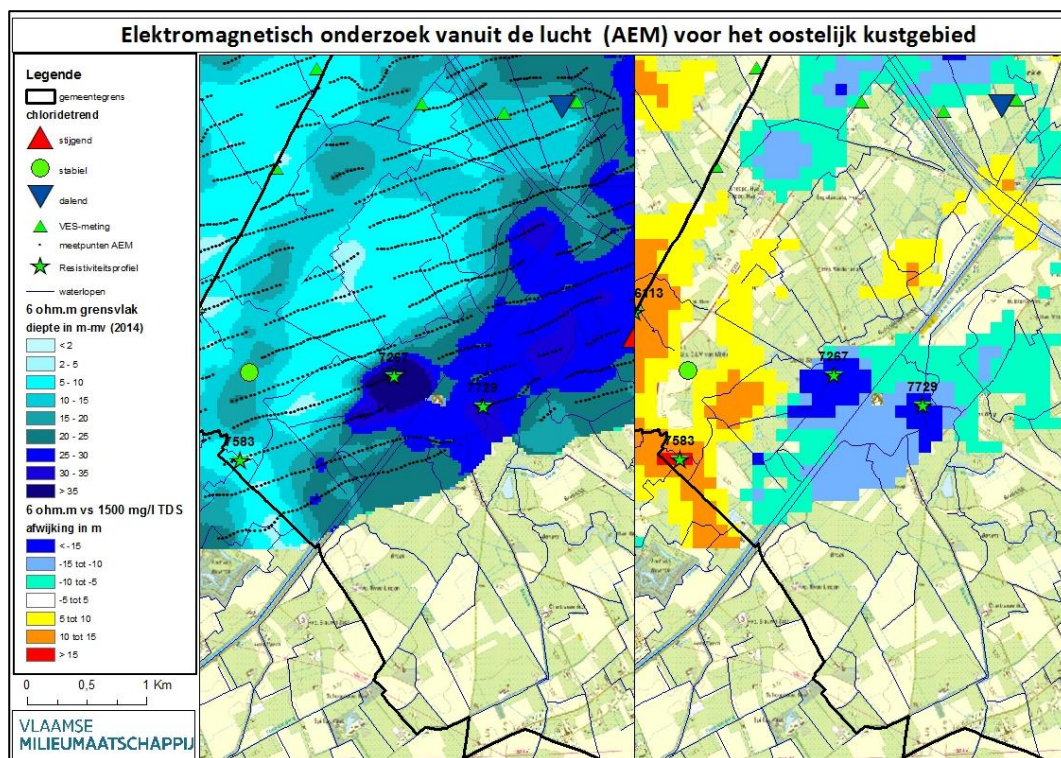
Ter hoogte van Damme daalt de resistiviteit tot minder dan $10\ \Omega\text{m}$ op een diepte van 20 m om daarna licht te stijgen en terug te dalen tot waarden van $6\ \Omega\text{m}$ worden bereikt (30 tot 50 m diep). Zoals eerder vermeld kan bij zandige afzettingen reeds vanaf resistiviteiten lager dan $10\ \Omega\text{m}$ sprake zijn van zilt grondwater. Het is daarom onduidelijk of er in het interval 20-30 m reeds sprake is van zilt grondwater. Figuur 49 geeft weer waar in het oostelijk kustgebied de grootste verschillen tussen 6 en $10\ \Omega\text{m}$ optreden. Deze locaties zijn beperkt. Damme centrum ligt echter binnen dergelijke zone. Het grensvlak nagaan met behulp van peilbuizen is aangewezen ter controle of in dit geval de diepte van het grensvlak geen overschatting vormt. Vast staat dat op een diepte aangeduid door het nieuwe grensvlak zilt water voorkomt.



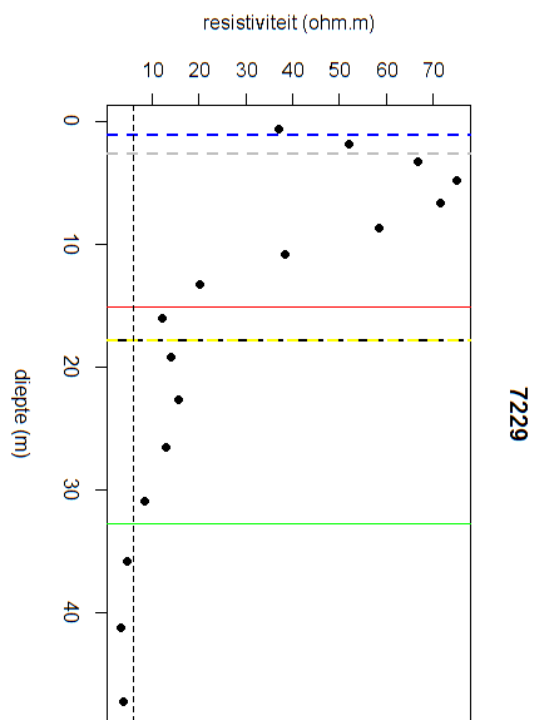
Figuur 45: situatie ter hoogte van de Lemspolder (links diepte $6\ \Omega\text{m}$ grensvlak; rechts verschil met $1500\ \text{mg/l TDS}$ grensvlak)



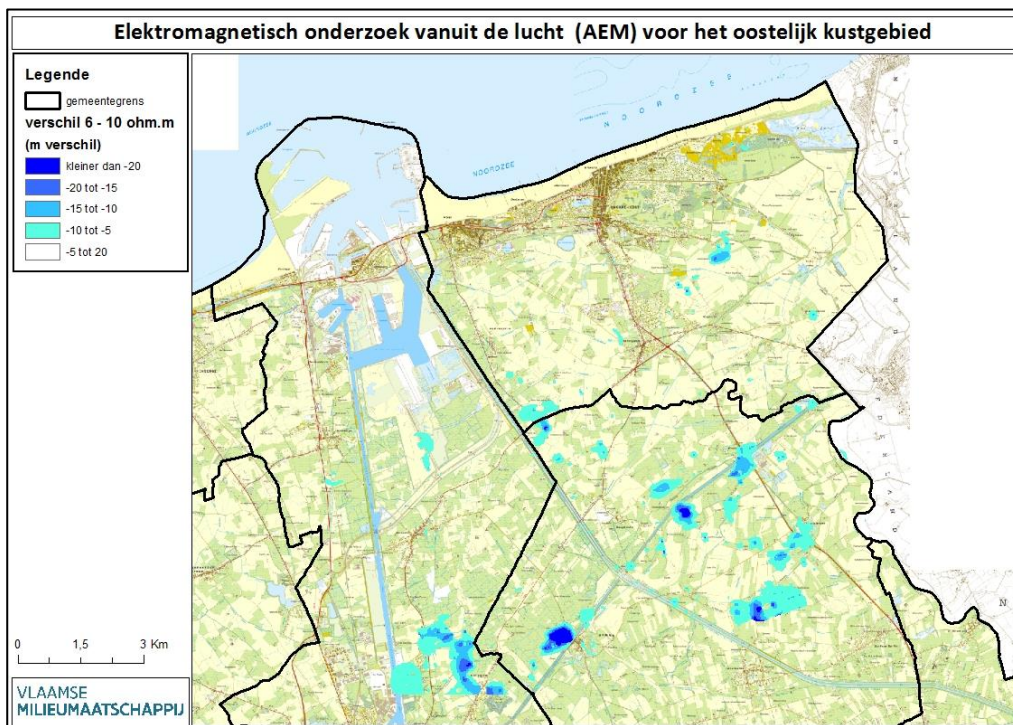
Figuur 46: resistiviteitsplot ter hoogte van Lemspolder. Het 6 Ωm-grensvlak (groen) bevindt zich dieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Het TDS-grensvlak bevindt zich nabij de basis van de HCOV 0150. Voor de legende, zie figuur 33



Figuur 47: situatie ter hoogte van Damme (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



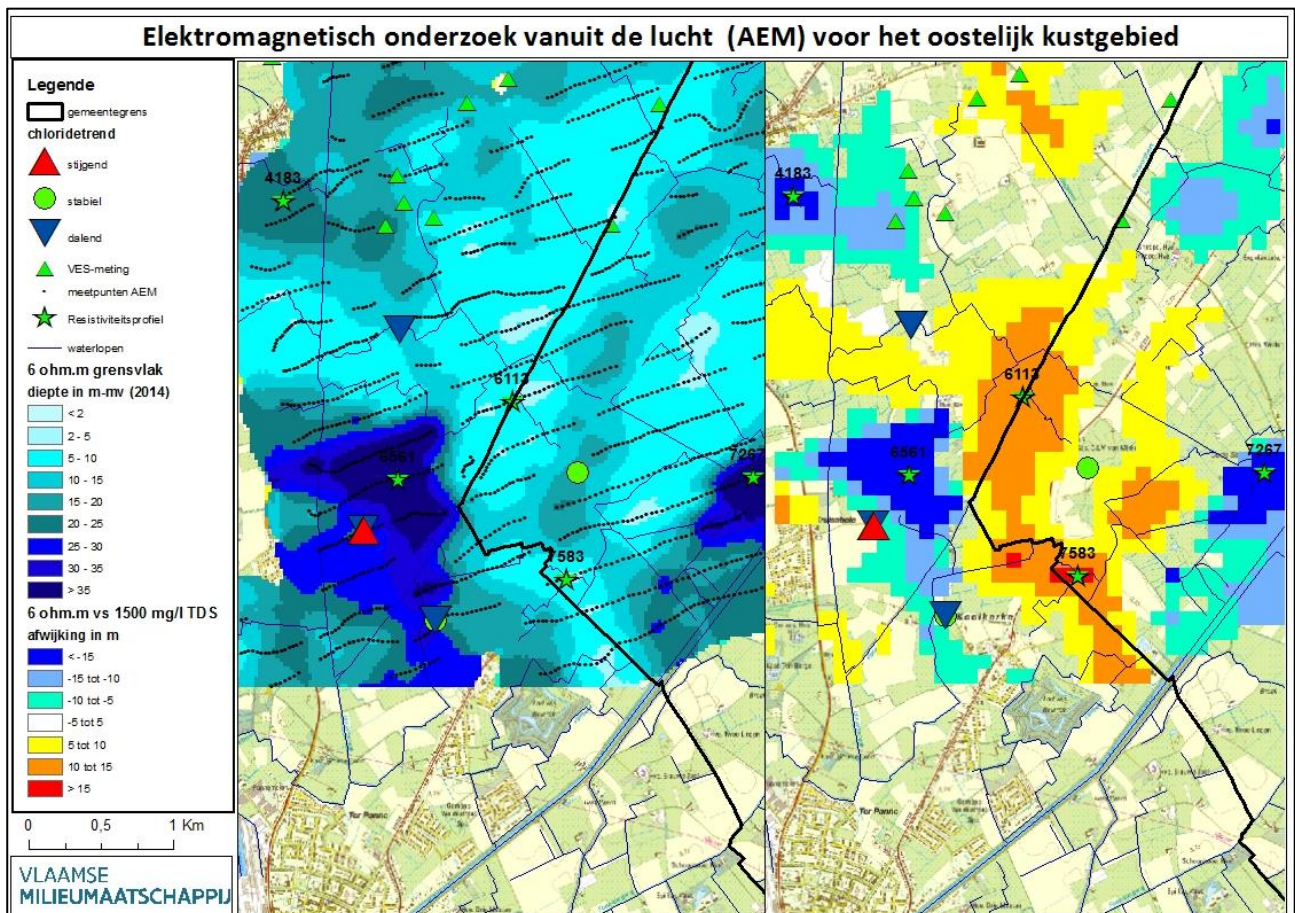
Figuur 48: resistiviteitsplot nabij zuidelijk deel centrum Damme. Het 6 Ω m-grensvlak (groen) bevindt zich dieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Merk op dat de diepte voor de 6, 8 en 10 Ω m ver uit elkaar liggen. Voor de legende, zie figuur 33



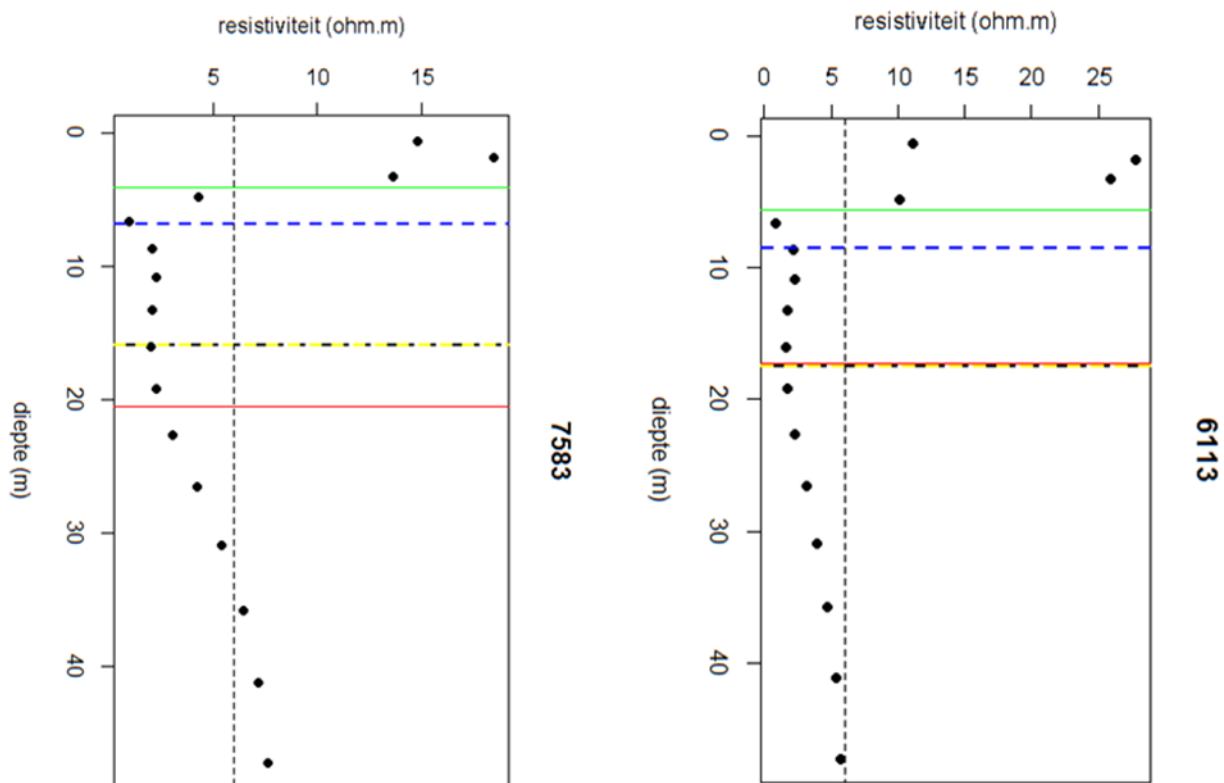
Figuur 49: voorkomen van de belangrijkste diepte-verschillen tussen het 6 en 10 Ω m grensvlak

10.3.2.4 Poldergebied tussen Koolkerke en Damme

De ziltere zones in vergelijking met de oude kaart houden verband met de aanwezigheid van polderwaterlopen en meer specifiek de Ronselarebeek/Scheidingsbeek op de grens met Brugge. De polderwaterlopen draineren en zorgen voor het lokaal optreden van zilte kwel. Het verschil met de oude kaart kan hierdoor te wijten zijn aan verschillen in interpolatie daar de oude kaart minder meetpunten ter beschikking had en de lokale zilte kwel niet steeds kon detecteren.



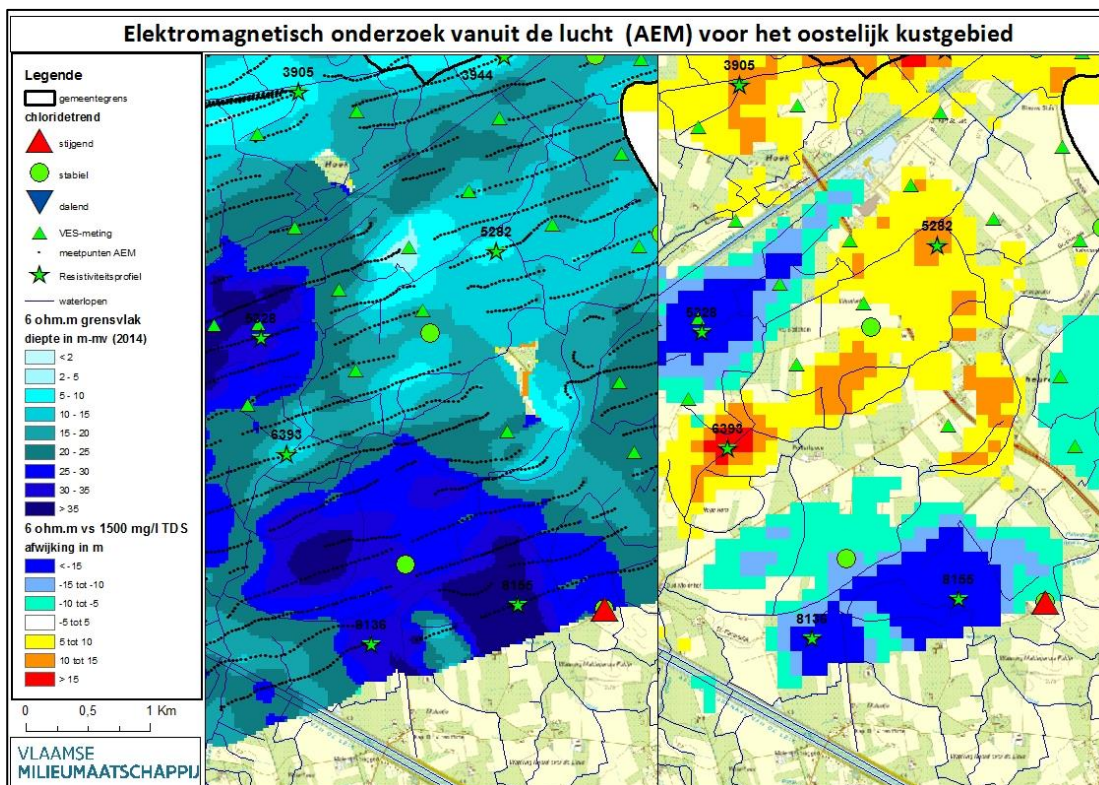
Figuur 50: situatie ter hoogte van grens Damme-Brugge (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



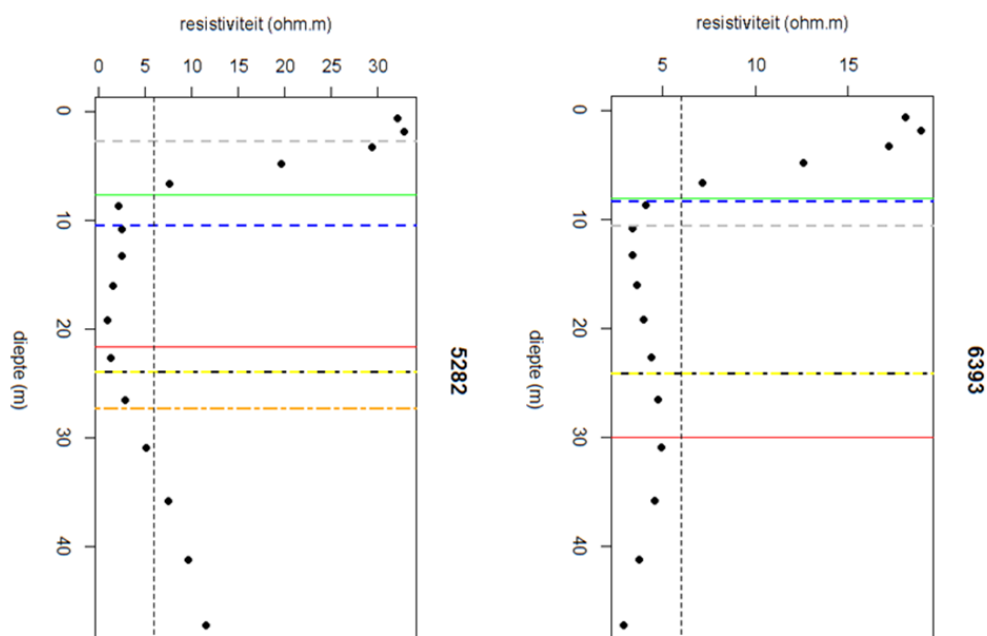
Figuur 51: resistiviteitsplots ter hoogte van de grens tussen Damme en Brugge. Het 6 Ω m-grensvlak (groen) bevindt zich ondieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Merk op dat de diepte voor de 6, 8 en 10 Ω m ver uit elkaar liggen. Voor de legende, zie figuur 33

10.3.2.5 Poldergebied Lapscheure

Terug dezelfde vaststelling: een ondieper grensvlak ter hoogte van de polderwaterlopen. De polderwaterlopen draineren en zorgen voor het lokaal optreden van zilte kwel. Het verschil met de oude kaart kan te wijten zijn aan verschillen in interpolatie daar de oude kaart minder meetpunten ter beschikking had en de lokale zilte kwel niet steeds kon detecteren.



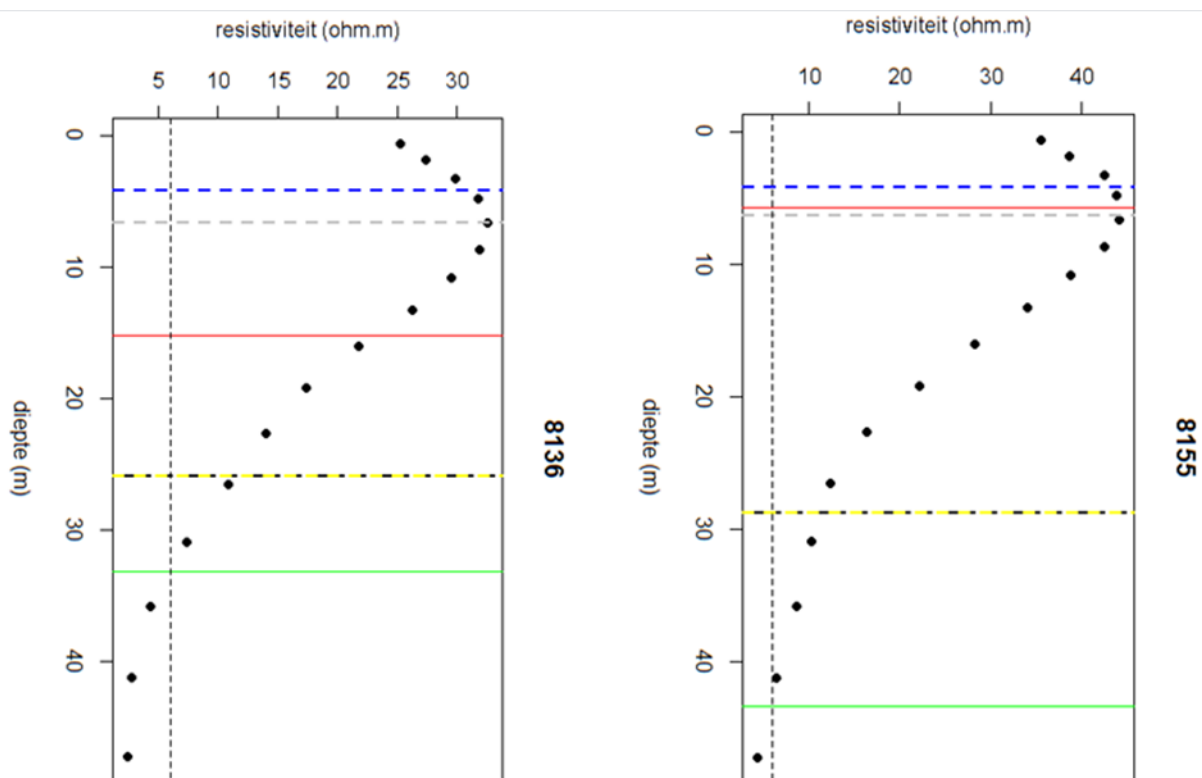
Figuur 52: situatie ter hoogte van Lapscheure en grens met de Zandstreek (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



Figuur 53: resistiviteitsplot ter hoogte van Sint-Jobspolder ten noorden van Lapscheure (links) en resistiviteitsplot ter hoogte van Onze-Lieve-Vrouwpolder ten westen van Lapscheure (rechts). Het 6 Ωm-grensvlak (groen) bevindt zich ondieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Het resistiviteitsprofiel ter hoogte van Sint-Jobspolder bevindt zich binnen het voorkomensgebied van de Bartoonklei. Voor de legende, zie figuur 33

10.3.2.6 Grens met de Zandstreek (Moerkerke-St-Rita)

Nabij de overgangszone met de Zandstreek vertoont de nieuwe kaart een zone met dieper liggend grensvlak ten opzichte van de oude kaart (zie figuur 52). Meetpunten van de oude kaart zijn in dit gebied niet gekend zodat onduidelijk is in hoeverre een verschil in interpolatie aan de basis kan liggen van dit verschil. Anderzijds kan vanuit de Zandstreek verzoeting optreden aan de rand van het poldergebied. Dit verschijnsel wordt immers ook door de oude kaart aangegeven iets oostelijker van de betreffende zone. Verder onderzoek is aangewezen om na te gaan of zoete kwel vanuit de Zandstreek oorzaak is van het verschil met de oude kaart.



Figuur 54: resistiviteitsplots ter hoogte van het overgangsgebied naar de zandstreek. Het 6 Ω m-grensvlak (groen) bevindt zich dieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Voor de legende, zie figuur 33

10.3.2.7 Besluit voor het grondgebied Damme

Binnen het projectgebied beschikt Damme over de belangrijkste zoetwaterreserves in poldergebied. De diepte van de zoetwaterlenzen bedraagt soms meer dan 40 m. Door het voorkomen van de Bartoonklei in het oostelijk deel van Damme is de uitbouw van zoetwaterlenzen in dit deel van het grondgebied beperkt tot ca. 20 m.

Ten noorden van de Damse Vaart zijn de zoetwaterlenzen te koppelen aan het voorkomen van kreekruggen. Net zoals op Brugs grondgebied betreft dit het Oudland (en deels Middelland) dat gekenmerkt wordt door reliëfsinversie met hooggelegen kreekruggen en laaggelegen poelgronden. Ten zuiden van de Damse Vaart, waar de polders jonger zijn, kan reliëfsinversie niet aan de basis liggen van de

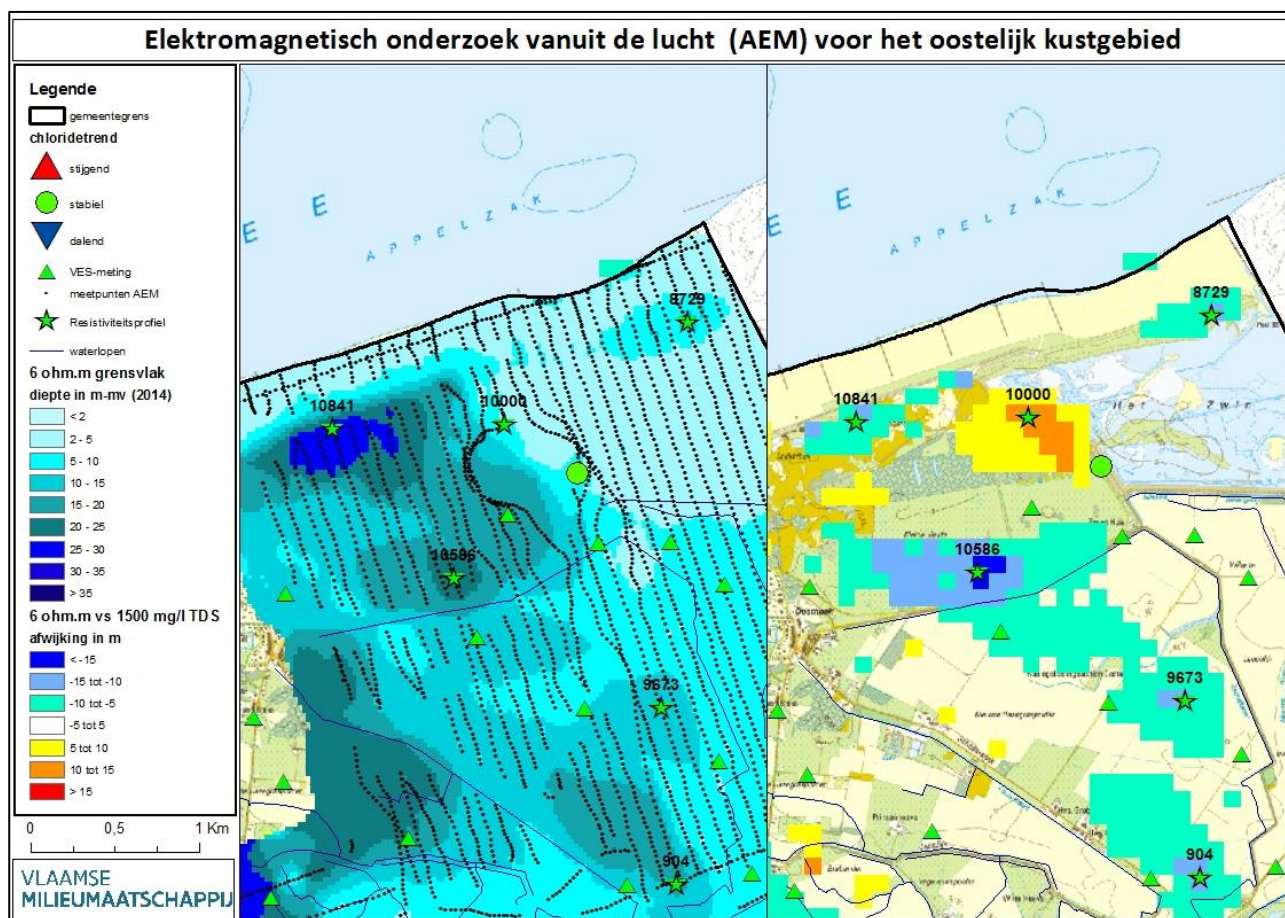
Waar het nieuwe grensvlak ondieper voorkomt is een duidelijke relatie te leggen met het voorkomen van drainerende polderwaterlopen en zoute kwel. Door de lagere dichtheid aan meetpunten bij de opmaak van de oude kaart zijn de verschillen tussen oude en nieuwe kaart voornamelijk te wijten aan een verschil in interpolatie. Er zijn niet direct knelpunten voor verzilting merkbaar.

10.3.3 Grondgebied Knokke

In de omgeving van het Zwin werden de vluchlijnen met een noord-zuid oriëntatie uitgevoerd en lijnafstand 100 m opdat een gedetailleerd beeld zou verkregen worden van de verziltingstoestand als onderdeel van een t0-monitoring uitbreiding Zwin.

De smalle duinstrook die de scheiding vormt tussen de strandzone en het Zwin (rechts bovenaan figuur 55), vertoont een dieper grensvlak in vergelijking met de oude kaart. Het verschil met de oude kaart kan te wijten zijn aan verschillen in interpolatie daar de oude kaart in deze zone geen meetpunten ter beschikking had en de (dunne) zoetwaterlens hierdoor niet kon gedetecteerd worden. Hetzelfde verhaal geldt voor de Zwinbosjes (linker bovenhoek). Deze zone kent een scherpe gradiënt van de diepte van het grensvlak richting strandzone waardoor bij het ontbreken van voldoende datapunten bij de opmaak van de oude kaart snel verschillen kunnen ontstaan met de nieuwe kaart.

[illegible]



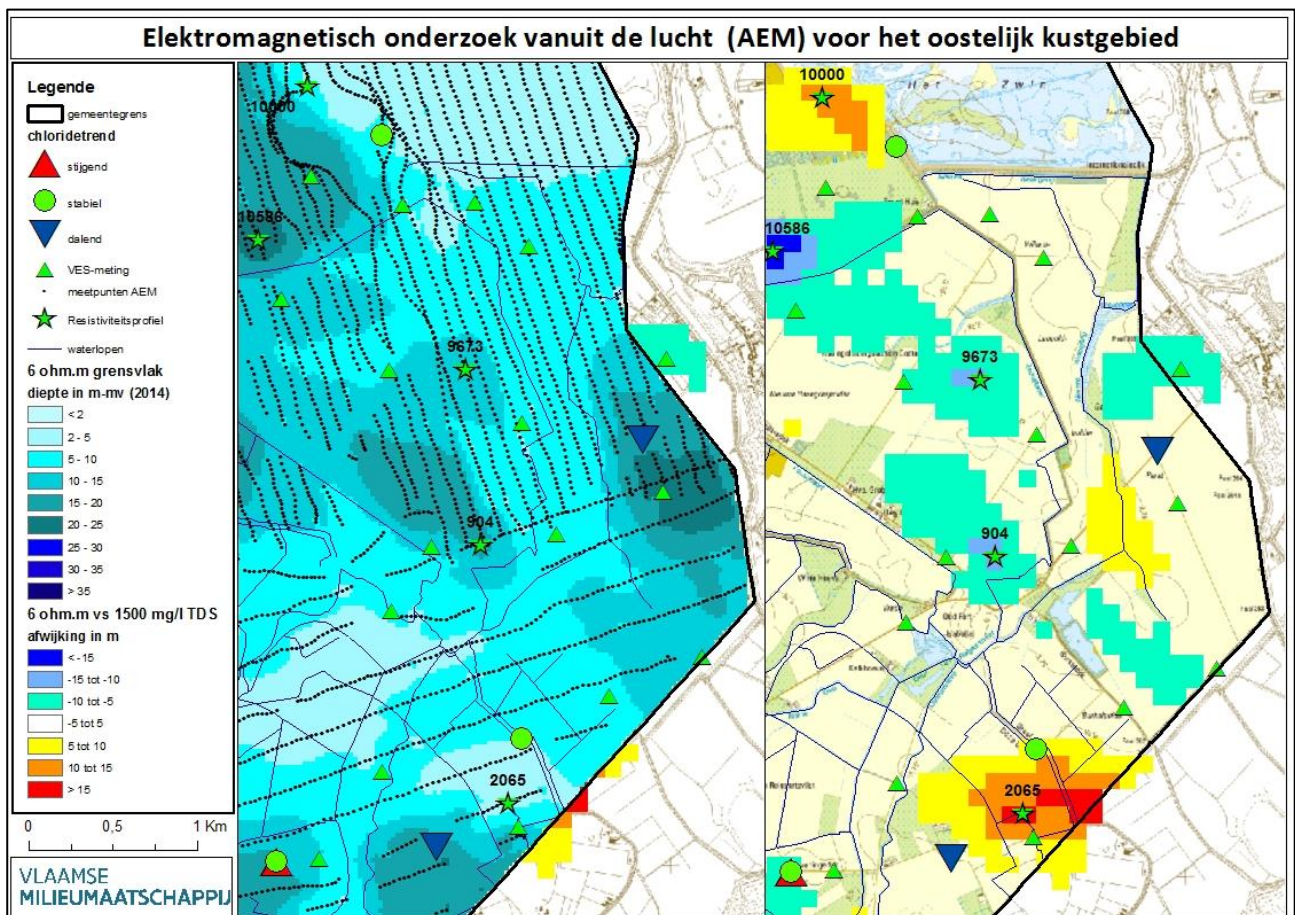
Figuur 55: situatie ter hoogte van het Zwingebied (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)

Ter hoogte van het voormalige Vogelreservaat (oostelijk deel van de Zwinbosjes) bevindt het grensvlak zich ondieper dan op de oude kaart. Op de oude kaart is de zoetwaterlens onder het oostelijk deel van de Zwinbosjes vrij breed ingetekend richting Zwin terwijl de nieuwe kaart beter de grenzen van het Zwin weerspiegelt. Interpolatie ligt hierdoor vermoedelijk aan de basis van het verschil tussen oude en nieuwe kaart.

Ter hoogte van de Kleyne Vlakte wordt een dieper grensvlak vastgesteld. Voor deze zone zijn geen metingen van de oude kaart gekend zodat door interpolatie terug verschillen kunnen ontstaan met de nieuwe kaart. De zone met ondiep grensvlak vermeld op de oude kaart ligt volgens de nieuwe kaart immers meer oostelijk georiënteerd. Door deze verschuiving ontstaat een verschil in diepte van het grensvlak.

10.3.3.2 Willem Leopoldpolder, Nieuwe Hazegraspolder en Graaf Jansdijk

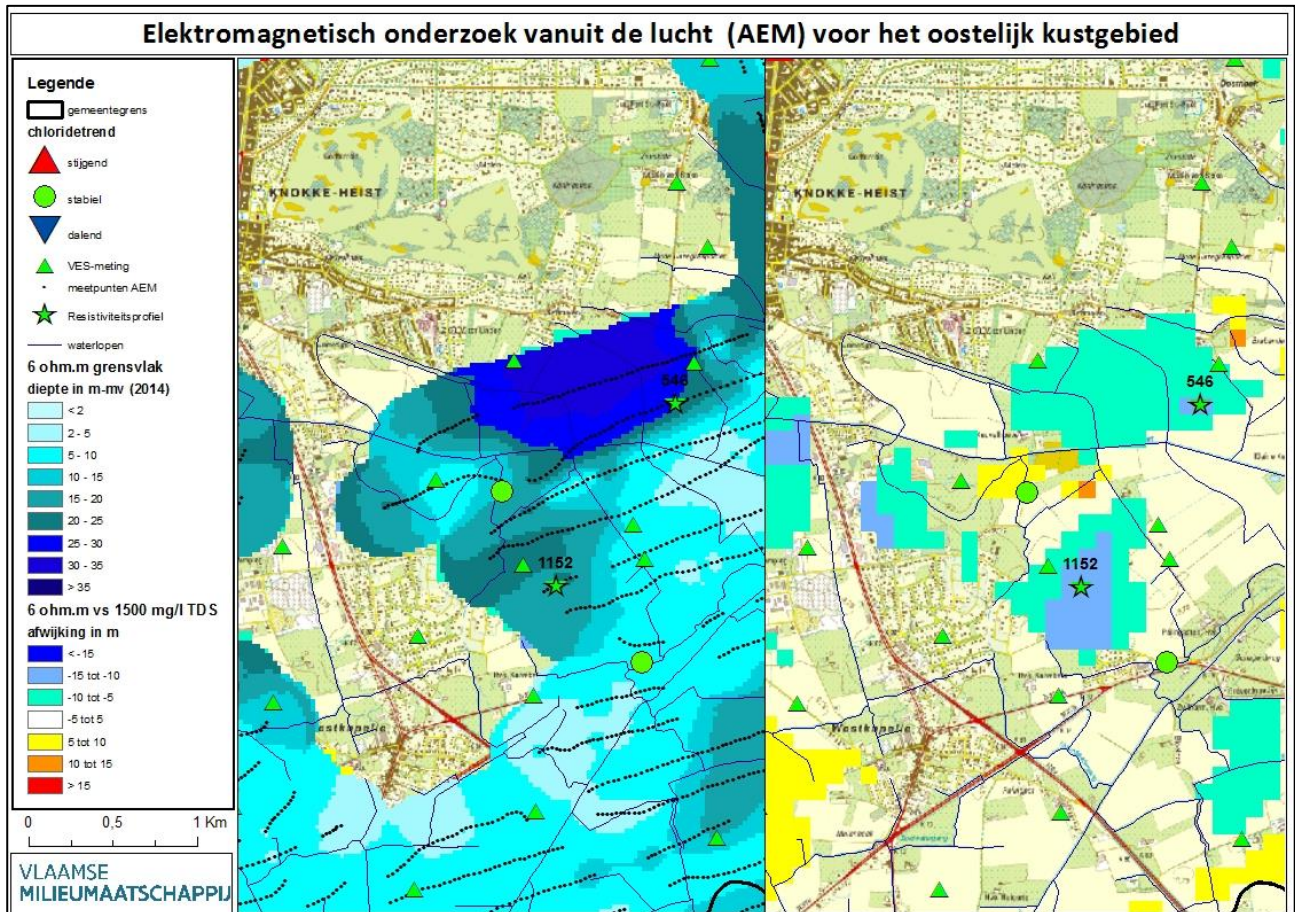
In het poldergebied ten zuiden van het Zwin tonen de verschillen met de oude kaart in hoofdzaak een dieper gelegen grensvlak. Uitzondering vormt de Nieuwe Watergang en het gebied langs de Graaf Jansdijk nabij de Nederlandse grens. Hier wordt een ondieper grensvlak vastgesteld. Dit wordt bevestigd door de peilput gelegen ten noorden van het helikoptermeetpunt 2065, met name 3-KPS-0001a. De ondiepe filter (7m-mv) toont reeds EC-waarden van 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ wat wijst op het ondiep voorkomen van het grensvlak (<7m). Zie ook figuur 11 waar deze peilput uiterst links wordt weergegeven en de oude kaart een dieper gelegen grensvlak toont. In de zones waar belangrijke verschillen met de oude kaart worden gemeten, ontbreken terug meetpunten van de oude kaart zodat verschillen in eerste instantie kunnen toegewezen worden aan een verschil in interpolatie.



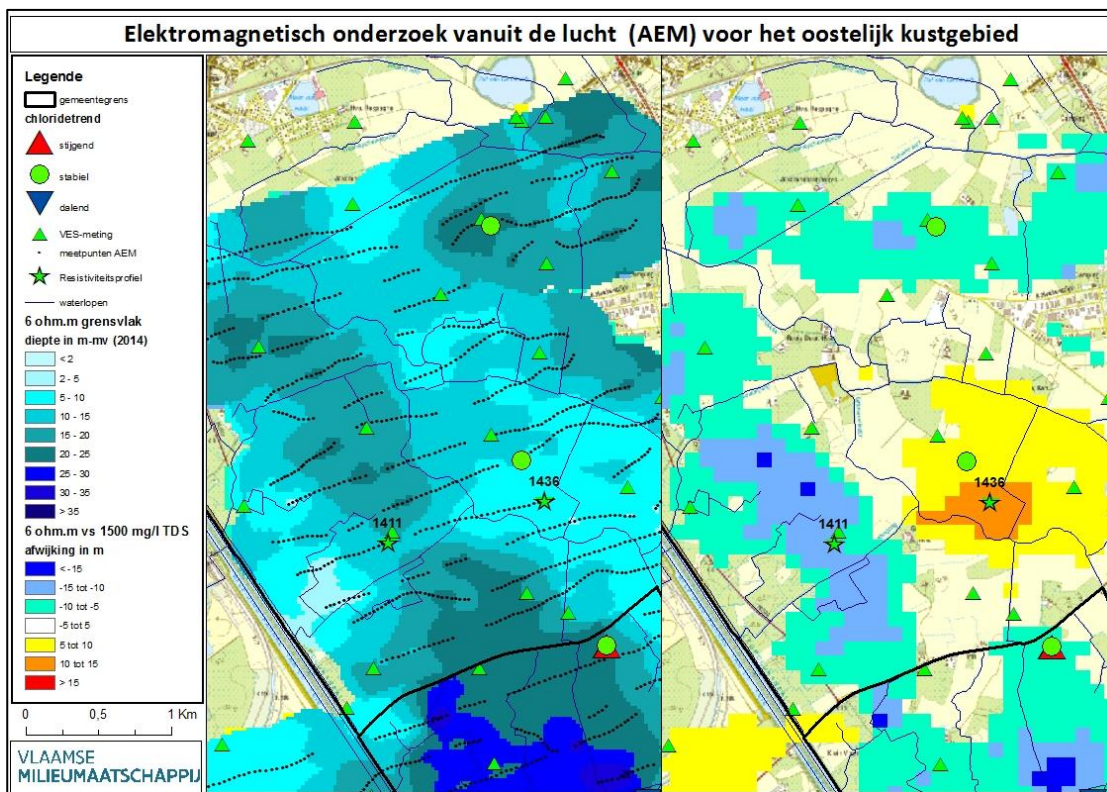
Figuur 58: situatie ter hoogte van het poldergebied ten zuiden van het Zwin (links diepte 6 Ω m grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)

10.3.3.3 Polders ten noorden Westkapelle

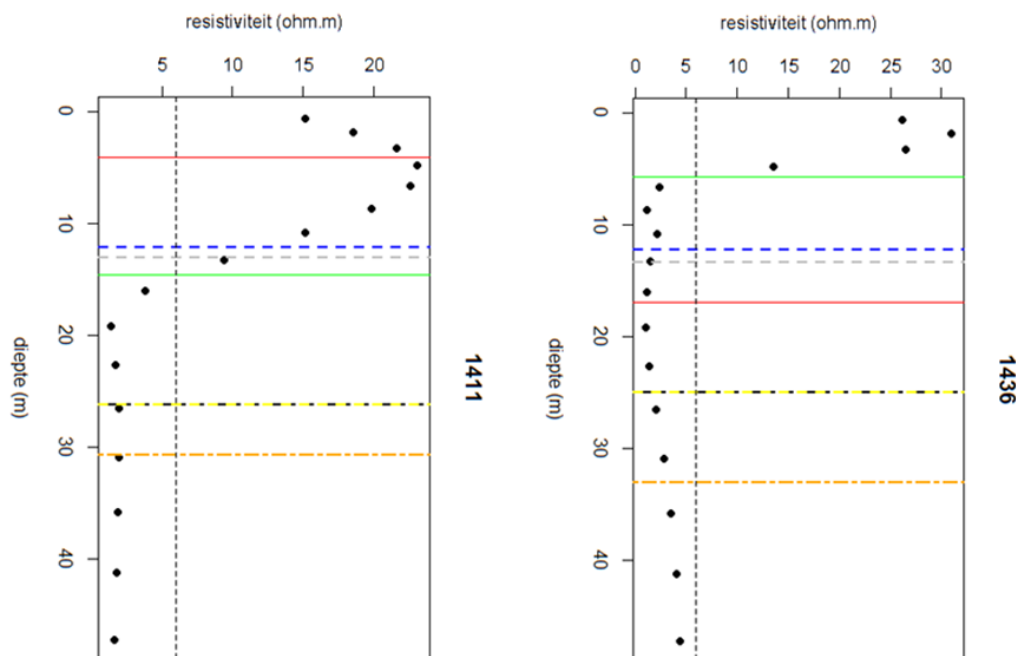
Ook hier wordt voornamelijk een dieper grensvlak vastgesteld in vergelijking met de oude kaart. Net ten zuiden van de Keukelhoeve is een ondieper grensvlak zichtbaar. Merk op dat de metingen van de oude kaart buiten de zones vallen met belangrijk verschil tussen de oude en de nieuwe kaart zodat interpolatiemethode terug aan de basis kan liggen van het verschil.



Figuur 61: situatie ter hoogte van Westkapelle (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



Figuur 63: situatie ter hoogte van Ramskapelle (links diepte 6Ωm grensvlak; rechts verschil met 1500 mg/l TDS grensvlak)



Figuur 64: resistiviteitsplot ter hoogte van Ramskapelle (links) en ten oosten van Ramskapelle (rechts). Het 6 Ωm-grensvlak (groen) bevindt zich in het eerste geval dieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak (rood). Ten oosten van Ramskapelle wordt het grensvlak echter ondieper dan het 1500 mg/l TDS-grensvlak aangetroffen. Voor de legende, zie figuur 33

Knokke kent één van de belangrijkste zoetwaterreserves aan onze kust, namelijk de zoetwaterlens onder het duingebied dat aangesproken wordt voor drinkwatervoorziening. Door het sterk bebouwd karakter kon slechts een beperkt gedeelte van het duingebied in kaart worden gebracht. Aanvullende onderzoeksmethodes zijn daarom noodzakelijk om een volledig beeld te verkrijgen van de verziltingstoestand van het duingebied.

Verschillen tussen de oude en nieuwe verziltingskaart zijn in hoofdzaak te wijten aan interpolatieverschillen. Er zijn niet direct knelpunten voor verzilting merkbaar. Gezien het ondiep voorkomen van het grensvlak in het poldergebied kan een verschuiving van het grensvlak door verandering in hydraulische randvoorwaarden gevolgen hebben voor de landbouw. Opvolging van grondwaterpeilen en grondwaterkwaliteit is daarom aangewezen.

Elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht of AEM is een snelle en efficiënte methode om de verziltingstoestand van het kustgebied in kaart te brengen. Voorwaarde is echter dat er weinig obstakels in het gebied aanwezig zijn die de metingen kunnen verstoren. Het poldergebied is door zijn open landschap en dunne bevolkingsdichtheid uitermate geschikt voor dergelijke metingen. Voor het duingebied is de toepassing van AEM minder voor de hand liggend. Belangrijke stukken van het duingebied aan onze kust zijn immers volgebouwd waardoor het uitvoeren van AEM beperkt is tot het open duinlandschap. Aanvullende onderzoeksmethodes zijn daarom noodzakelijk om de zoet-zoutwaterverdeling onder het duingebied volledig in kaart te brengen.

Het 6 Ωm-grensvlak toont een complexe verdeling van zoet en zout grondwater. Niettegenstaande deze complexiteit is er een correlatie merkbaar met de bodemopbouw, de topografie en het zoutgehalte van de waterlopen. Waar het grensvlak ondiep voorkomt, hebben we te maken met laaggelegen en slecht doorlatende poelgronden. Onder het aanwezige netwerk van polderwaterlopen is er bovendien een opwaartse grondwaterstroming die zorgt voor het ondiep voorkomen van het grensvlak. In de topografisch hoger gelegen gebieden zoals de kreekruggen, het duingebied en de overgangszone naar de Zandstreek, bevindt het grensvlak zich dieper. De waterlopen hebben er een zoetere signatuur. Bijzondere gevallen

71

Uit een vergelijkende analyse blijkt dat de nieuwe kaart weinig verschilt met de oude kaart, waardoor regionaal kan gesproken worden over een stabiele verziltingstoestand. Lokaal zijn verschillen merkbaar maar deze kunnen in hoofdzaak toegewezen worden aan interpolatieverschillen. De nieuwe kaart is immers een stuk gedetailleerder dankzij het groot aantal meetpunten. Het belangrijkste fenomeen dat wijst op een veranderende verziltingstoestand doet zich voor ter hoogte van de achterhaven van Zeebrugge, waar onder de opgehoogde zones zoetwaterlenzen ontstaan. In het aanpalend lagergelegen poldergebied ontstaat zilte kwel. Het Boudewijnkanaal kon door obstakels niet volledig in kaart worden gebracht, maar waar gemeten werd, lijkt de toestand stabiel te zijn. Net zoals voor het duingebied zijn ook hier aanvullende onderzoeksmethodes noodzakelijk om een volledig beeld van de verziltingstoestand te verkrijgen.

12 REFERENCES

De Breuck, W., De Moor, G., Maréchal, R. & Tavernier, R. (1974). Diepte van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische laag van het Belgische kustgebied (1963-1973). Verziltingskaart. Brussel, Militair Geografisch Instituut.

Verziltingstoestand van het oostelijk kustgebied

Vandenbohede, A., Courtens, C., Lebbe, L. & De Breuck, W. (2010). Fresh-salt water distribution in the central Belgian coastal plain: an update. *Geologica Belgica*, volume 13, number 3 : 163-172.

Vandenbohede, A. & Lebbe, L. (2002). Hydrogeologische bijdrage in kader van het MER voor de uitbreiding van het zuidelijk kanaaldok in de achterhaven van Zeebrugge. Rapport GROMO 2002/04.

Vandenbohede, A., Walraevens, K. & De Breuck, W. (2015). What does the interface on the fresh-saltwater distribution map of the Belgian coastal plain represent? *Geologica Belgica* 18/1, 31-36.

Vandeveld, D. , Schaars, F., Viezzoli, A. & Gisseloe, P. (2014). Actualization of a 40 year old salinization map of the eastern Belgian coast using airborne time-domain electromagnetic survey (SkyTEM). Proceedings, 23th Salt Water Intrusion Meeting, Husum, Germany.

VITO (2014). VLAKO-referentietask voor de Vlaamse overheid, Afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen (ALBON).

VMM (2008). Grondwater in Vlaanderen: het Kust- en Poldersysteem. Vlaamse Milieumaatschappij. Aalst. 93 p.

Vrancken, A. (1997). Hydrogeologische en hydrogeochemische studie van het ondiepe grondwaterreservoir te Knokke. Universiteit Gent, Onuitgegeven Licentiaatsthesis.

VUB (2005). Hydrogeologische detailstudie van de ondergrond in Vlaanderen - Eindrapport. Onderzoeksoopdracht voor AMINAL, afdeling Water.

[illegible]

BIJLAGEN

[illegible]

